



ODSurf: Modélisation et réalisation d'une couche de roulement de chaussée optimisée, dense et peu bruyante

Antoine Beguere, Michel Berengier, Julien Cesbron, Frédéric Conte, Eric Coquelle, Denis Duhamel, Philippe Klein, Ladan Palhevani, Bertrand Pouteau, Biyu Tian, et al.

► To cite this version:

Antoine Beguere, Michel Berengier, Julien Cesbron, Frédéric Conte, Eric Coquelle, et al.. ODSurf: Modélisation et réalisation d'une couche de roulement de chaussée optimisée, dense et peu bruyante. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 213p. hal-01281369

HAL Id: hal-01281369

<https://hal.science/hal-01281369>

Submitted on 2 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ODSurf : Modélisation et réalisation d'une couche de roulement de chaussée optimisée, dense et peu bruyante

Rapport final

Version finale de Février 2016

N° de contrat : 11 17 C0038

Opération de recherche réalisée par : l'IFSTTAR, l'ENPC, Colas S.A et EUROVIA
Avec le soutien de l'ADEME

Coordination technique : Emmanuel THIBIER – DVTD\SOU



RAPPORT DE RECHERCHE

REMERCIEMENTS

Ce document a été rédigé grâce à la contribution écrite des différents partenaires dont voici une liste exhaustive par ordre alphabétique :

Antoine BÉGUÈRE (CDD IFSTTAR – LAE)
 Michel BÉRENGIER (IFSTTAR - LAE)
 Julien CESBRON (IFSTTAR – LAE)
 Frédéric CONTE (CDD IFSTTAR – LAE)
 Éric COQUELLE (COLAS)
 Denis DUHAMEL (ENPC – Paris Tech)
 Philippe KLEIN (IFSTTAR – LAE)
 Ladan PAHLEVANI (CDD ENPC – Paris Tech)
 Bertrand POUTEAU (EUROVIA)
 Biyu TIAN (Post-Doctorante IFSTTAR - LAE)
 Bin WANG (Doctorant ENPC – Paris Tech)

Pour les expérimentations tant en France qu'en Allemagne, ont participé (par ordre alphabétique) :

Roger CHATAGNON (IFSTTAR – LAE)
 Jean-Michel CLAIRET (IFSTTAR – LAE)
 Vincent GARY (IFSTTAR – LAE)

Ont également contribué à ce travail (par ordre alphabétique) :

Gwenaël CUMUNEL (ENPC – Paris Tech)
 Joël LELONG (IFSTTAR – LAE)
 Judicaël PICAUT (IFSTTAR – LAE)
 Dobrinka STOYANOVA (CDD IFSTTAR – LAE)
 Honoré YIN (ENPC – Paris Tech)

Nos remerciements vont également à nos collègues allemands qui ont participé à ce projet et plus particulièrement Peter Johan GUSIA de la BAST (animateur des projets allemands), Mme Beate ALTREUTHER et M. Manuel MÄNNEL de la Société Müller BBM.

CITATION DE CE RAPPORT

M. BÉRENGIER, J. CESBRON, Ph. KLEIN, A. BÉGUÈRE, F. CONTE, B. TIAN, L. PALHEVANI, D. DUHAMEL, B. WANG, B. POUTEAU, E. COQUELLE, 2016, ODSurf : Modélisation et réalisation d'une couche de roulement de chaussée optimisée, dense et peu bruyante, – Rapport du contrat ADEME 11 17 C0038. 213 pages.

Si le rapport est en ligne, ajouter : Cet ouvrage est disponible en ligne sur www.ademe.fr, rubrique Médiathèque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Résumé	9
Abstract	9
Contexte général	10
Objectifs	10
Synthèse des résultats	11
1. Introduction	11
2. Tâche n°1 : Management du projet	11
3. Tâche n°2 : Production de surfaces de chaussée denses optimales	12
3.1. Résumé des travaux allemands : appel d'offre BAST	13
3.1.1. Résumé des résultats du projet UHPC [2]	14
3.1.1.1. Conception de la texture de surface	14
3.1.1.2. Mesures acoustiques	15
3.1.1.3. Conclusion	17
3.1.2. Résumé des résultats du projet « pavés de béton en ciment poreux » [6]	17
3.1.2.1. Conception de pavés en béton de ciment peu bruyants	18
3.1.2.2. Résultats	18
3.1.3. Résumé des résultats du projet LIDAK [7]	18
3.1.3.1. Conception du matériau	19
3.1.3.2. Résultats des expérimentations en laboratoire et in situ	19
3.1.4. Premières conclusions sur les expériences allemandes	20
3.2. Contribution française : optimisation des couches de roulement conventionnelles	20
3.2.1. Contribution de la Société Colas	21
3.2.2. Contribution de la Société Eurovia Management	23
3.2.2.1. Chantier expérimental de Villeneuve sur Lot (EUROVIA Management)	23
3.2.2.1.1. Réalisation du chantier	23
3.2.2.1.2. Elaboration du programme d'expérimentations in situ	28
3.2.2.1.3. Bilan du chantier expérimental de Villeneuve sur Lot	40
3.3. Mesures de texture et de bruit sur les planches d'essais (IFSTTAR)	40
3.3.1. Sites d'essais et revêtements testés	40
3.3.1.1. BBTM 0/4 – Planche d'essais de Mouvaux (France)	41
3.3.1.2. BBTM 0/6 – Planche d'essais de Villeneuve-sur-Lot (France)	42
3.3.1.3. UHPC – Planche d'essais de Meinerzhagen (Allemagne)	43

3.3.2.	Mesures de texture 3D	44
3.3.2.1.	Équipement et méthode de mesure	44
3.3.2.2.	Méthode d'analyse des données	47
3.3.2.3.	Résultats et comparaisons	49
3.3.3.	Mesures d'absorption acoustique	53
3.3.3.1.	Équipement et méthode de mesure	53
3.3.3.2.	Méthode d'analyse des données	54
3.3.3.3.	Résultats	55
3.3.4.	Mesures de bruit de contact pneumatique/chaussée	56
3.3.4.1.	Équipements et méthode de mesure	56
3.3.4.2.	Méthode d'analyse des données	59
3.3.4.3.	Résultats et comparaisons	60
3.3.4.4.	Quelques premières conclusions	71
4.	Tâche n°3 : Amélioration des modèles de prévision du bruit et de la DEUFRABASE	72
4.1.	Base de données texture/bruit pour les modèles de prévision du bruit	72
4.1.1.	Sites d'essais et revêtements testés	72
4.1.1.1.	Piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (France)	72
4.1.1.2.	Piste d'essais de la BAST à Geilenkirchen (Allemagne)	74
4.1.2.	Mesures de texture	75
4.1.3.	Mesures d'absorption acoustique	81
4.1.4.	Mesures de bruit de roulement	82
4.1.4.1.	Résultats pour le pneumatique à motifs Michelin Energy E3A 195/60 R15	83
4.1.4.2.	Résultats pour le pneumatique lisse Avon radial slick 210/60 R16	90
4.1.4.3.	Analyse des résultats	96
4.2.	Approche hybride pour la prévision du bruit (modèle HyRoNE)	99
4.2.1.	Principe du modèle HyRoNE	99
4.2.2.	Construction du modèle HyRoNE 2D avec les données ODSurf	100
4.2.3.	Enveloppement 3D	102
4.2.3.1.	Motivations	102
4.2.3.2.	Donnée d'entrée pour le calcul d'enveloppement 3D	104
4.2.3.3.	Méthode de calcul	104
4.2.3.4.	Sorties du modèle	105
4.2.4.	Corrélations bruit/texture enveloppée et prévision des niveaux de bruit	107

4.2.4.1.	Corrélations bruit/texture enveloppée	107
4.2.4.2.	Prévision des niveaux de bruit des revêtements denses	108
4.2.4.3.	Prévision des niveaux de bruit de revêtements absorbants	109
4.2.5.	Conclusion	110
4.3.	Approche physique pour la prévision du bruit	111
4.3.1.	Partitionnement de surface de chaussée pour le contact pneumatique/chaussée (<i>en anglais</i>)	111
4.3.1.1.	Introduction	111
4.3.1.2.	Principle of road surface partitioning	112
4.3.1.3.	Numerical code for the partitioning of a road surface	114
4.3.1.4.	Partitioning results for real road surfaces	119
4.3.1.5.	Conclusions	128
4.3.2.	Comparaison des divers modèles de pneumatique pour des applications au bruit de roulement (<i>en anglais</i>)	128
4.3.2.1.	Introduction	128
4.3.2.2.	Brief review on tyre models	129
4.3.2.2.1	Single Degree of Freedom (SDOF) System	130
4.3.2.2.2	Rotating Ring Model	130
4.3.2.2.3	Timoshenko Circular Beam Model	131
4.3.2.2.4	Orthotropic Plate Model	131
4.3.2.2.5	Periodic 3D Model	131
4.3.2.2.6	Full 3D Model	132
4.3.2.2.7	Experimental results	132
4.3.2.3.	Results and discussions	133
4.3.2.3.1.	Homogeneous smooth tyre	133
4.3.2.3.2.	Homogeneous grooved tyre	135
4.3.2.3.3.	Non-homogeneous grooved tyre	136
4.3.2.4.	Conclusion	137
4.3.3.	Modélisation des mécanismes de pompage d'air	138
4.3.3.1.	Introduction	138
4.3.3.2.	Modélisation analytique	138
4.3.3.2.1.	Analyse géométrique de la zone de contact	138
4.3.3.2.2.	Mise en place du modèle de source	139
4.3.3.3.	Calcul du rayonnement acoustique	140
4.3.3.4.	Modélisation CFD	141

4.3.3.5.	Simulation CFD : Cavité cylindrique (3D)	141
4.3.3.5.1.	Configurations	141
4.3.3.5.2.	Résultats sans variation de volume	142
4.3.3.5.3.	Résultats avec variation de volume	143
4.3.3.6.	Simulation CFD : Rainure transversale ouverte (3D)	144
4.3.3.6.1.	Rainure transversale seule	144
4.3.3.6.2.	Etude de la rainure transversale ventilée	145
4.3.3.7.	Simulation CFD : Etude de la porosité latérale sur le bruit généré (2D)	145
4.3.3.7.1.	Configurations étudiées	145
4.3.3.7.2.	Résultats de simulation	146
4.3.3.7.3.	Evaluation de la résistivité à l'écoulement de l'air et effet sur le bruit émis	146
4.3.3.8.	Simulation CFD : Cas d'une surface rainurée dense (3D)	148
4.3.3.8.1.	Configuration étudiée	148
4.3.3.8.2.	Résultats de simulation	148
4.3.3.8.3.	Evaluation de la résistivité au passage de l'air	149
4.3.3.9.	Conclusion	150
4.3.4.	Modélisation de l'effet dièdre considérant les textures du pneumatique et de la chaussée (<i>en anglais</i>)	151
4.3.4.1.	Introduction	151
4.3.4.2.	Model	152
4.3.4.2.1.	Multi-domain coupling methods	152
4.3.4.2.2.	Exterior subdomain	153
4.3.4.2.3.	Straight parts of the network	153
4.3.4.2.4.	Junctions of the network	155
4.3.4.3.	Optimization methods	156
4.3.4.3.1.	Genetic algorithm	157
4.3.4.3.2.	2DNRF	158
4.3.4.3.3.	End corrections	159
4.3.4.4.	Simulation and experimental validation	162
4.3.4.4.1.	Wooden structures	162
4.3.4.4.2.	Tyre	166
4.3.4.5.	Applications to treads and textures	169
4.3.4.5.1.	Tyre treads	169
4.3.4.5.2.	Road textures	174

4.3.4.6.	Conclusions	176
4.4.	La DEUFRABASE	177
4.4.1.	Introduction	177
4.4.2.	Définitions	177
4.4.3.	Notions de base	178
4.4.3.1.	Pourquoi Django ?	178
4.4.3.2.	Principes fondamentaux de Django	178
4.4.3.3.	Philosophie de développement	178
4.4.3.4.	Principes de fonctionnement de Django	179
4.4.4.	Développement du calcul des indicateurs acoustiques	180
4.4.4.1.	Géométries – Étape 1	180
4.4.4.2.	Revêtements de chaussée – Étape 2	181
4.4.4.3.	Trafic – Étape 3	183
4.4.4.4.	Résultats – Étape 4	184
4.4.5.	Administration de la base de données	186
4.4.5.1.	Le site de l'administration	186
4.4.5.2.	Les scripts Datatools	187
4.4.6.	Perspectives	188
4.4.6.1.	Intégration de géométries et de revêtements urbains	188
4.4.6.2.	Ajout des futurs indicateurs	188
4.4.6.3.	Autres perspectives	188
4.4.7.	Arborescence de la DEUFRABASE	189
4.4.8.	Modèle MVC appliqué à la DEUFRABASE	190
5.	Tâche n°4 : Valorisation et dissémination des résultats	190
5.1.	Compte-rendus des réunions plénières	191
5.1.1.	Réunions du consortium français	191
5.1.2.	Réunions du consortium franco-allemand	191
5.2.	Rapports divers	191
5.3.	Présentations françaises lors des séminaires bilatéraux	192
5.3.1.	Séminaire à Bergish-Gladbach en Allemagne en janvier 2013	192
5.3.2.	Séminaire à Paris en novembre 2013	192
5.3.3.	Séminaire à Aix-la-Chapelle en Allemagne en octobre 2014	192
5.4.	Présentations allemandes lors des séminaires bilatéraux	193

5.4.1.	Séminaire à Bergish-Gladbach en Allemagne en janvier 2013	193
5.4.2.	Séminaire à Paris en novembre 2013	193
5.4.3.	Séminaire à Aix-la-Chapelle en Allemagne en octobre 2014	194
5.5.	Présentations lors du séminaire de clôture de Bron en décembre 2015	194
5.6.	Présentations lors des Journées Techniques Acoustique et Vibrations	195
5.6.1.	JTAV à Blois en mai 2013	195
5.6.2.	JTAV à Bordeaux en juin 2014	195
5.7.	Communication lors de congrès avec actes	195
5.7.1.	Congrès internationaux	195
5.7.2.	Congrès nationaux	196
5.8.	Articles dans une revue à comité de lecture	196
6.	Bilan / Principaux résultats obtenus	196
7.	Conclusions / Perspectives	197
	Références bibliographiques	199
	Index des tableaux et figures	202
	Sigles et acronymes	211

Résumé

Le projet ODSurf fait suite à un précédent projet P2RN, relatif à l'émission et la propagation du bruit de roulement, réalisé dans le cadre de la collaboration franco-allemande DEUFRAKO. Au cours de P2RN, une texture de chaussée optimale du point de vue de l'émission sonore avait été calculée. L'actuel projet ODSurf a été principalement dédié à l'élaboration et la mise en œuvre de nouvelles technologies à faible bruit et de nouveaux matériaux adaptés au milieu urbain. Des solutions originales ont été imaginées, mises en œuvre sur site et testées. Parallèlement à ces approches technologiques, de nouveaux modèles ont été développés pour mieux caractériser les divers phénomènes physiques mis en jeu lors du roulement d'un pneumatique sur une chaussée texturée. Les phénomènes vibratoires, de pompage d'air ainsi que l'effet dièdre ont été plus particulièrement étudiés et les principaux résultats sont détaillés dans le présent document. Outre l'approche modélisation, ce projet a fait l'objet d'une forte composante expérimentale utile à la fois pour la validation des modèles mais aussi pour permettre une classification acoustique des revêtements routiers. Les mesures présentées dans ce rapport ont été réalisées à la fois sur pistes d'essai et sur site réel sur lesquels ont été mis en place les revêtements optimisés de conception classique ou industrielle, tant en France et qu'en Allemagne. Enfin, ce document se termine par la base de données commune « DEUFRABASE ». Elle regroupe les émissions sonores produites par le roulement de véhicules légers et lourds sur un large panel de revêtements routiers français et allemands pour diverses configurations de propagation. Mise à jour en fin de projet, cette base déposée sur le serveur de l'Ifsttar sera prochainement accessible gratuitement en ligne. De par sa conception actuelle, elle permettra aisément des mises à jour régulières tant en termes de configurations de sites que de nouveaux revêtements de chaussée. Elle permettra ainsi d'être un bon outil pour estimer l'impact acoustique du trafic routier pour de multiples configurations périurbaines et urbaines. A la lumière des résultats enregistrés au cours de ce projet, les étapes futures concerneront d'une part, l'amélioration et l'intégration des diverses approches de modélisation des différents phénomènes de génération de bruit de roulement dans un outil « unique » afin d'avoir une estimation globale de l'impact des couches de roulement sur le niveau sonore produit par le trafic routier et d'autre part, d'étendre la DEUFRABASE à un plus grand nombre de situations réalistes.

Abstract

ODSurf project is following a previous P2RN project dealing with the emission and propagation of rolling noise, carried out in the framework of the German-French collaboration DEUFRAKO. During P2RN, an optimum pavement texture in terms of the noise emission was calculated. The current ODSurf project was mainly dedicated to the development and implementation of low noise new technologies and new materials adapted to urban environment. Original solutions have been investigated, implemented and tested on-site. In parallel to these technological approaches, new models have been developed to better characterize various physical phenomena produced when a tyre is rolling on a textured pavement. Vibration phenomena, air pumping and the horn effect were specifically studied and the main results are detailed in this document. In addition to the modelling approach, this project includes a strong experimental component useful for model validation and also to allow an acoustic classification of road surfaces. The measures presented in this report were carried out both on test tracks and actual site on which were positioned the optimized conventional or industrially designed coatings, both in France and Germany. Finally, this report is ending with the common database "DEUFRABASE". It includes the noise produced by light and heavy vehicles running on a large panel of French and German road surfaces for various propagation configurations. Updated at the end of the project, this database posted on the Ifsttar server will be soon freely available online. From its current design, it will easily allow regular updates in terms of site configurations and new road surfaces. It thus will be a good tool to estimate the acoustic impact of traffic for many suburban and urban situations. Following the results achieved during the project, the next steps will concern on one hand, the improvement and integration of the various modelling approaches of different tyre noise generation phenomena in a "unique" tool in order to have an overall estimation of the impact of road surfaces on the sound level produced by road traffic and secondly, to extend the DEUFRABASE to more realistic situations.

Contexte général

La lutte contre les nuisances sonores produites par la circulation routière représente depuis de nombreuses années une thématique de recherche prioritaire tant pour les laboratoires de recherche en acoustique des transports que pour les entreprises routières. Déjà, sur la période 1990-2000, ces dernières travaillaient à la conception de couches de roulement peu bruyantes. Sur la même période, des études sur les caractéristiques de drainabilité des chaussées dans le but de limiter les phénomènes d'aquaplanage et de projection d'eau préjudiciables à la sécurité des usagers de la route avaient mis en évidence l'efficacité de structures poreuses de type Béton Bitumineux Drainant (BBD_r), d'épaisseur 4 à 20 cm, présentant une porosité communicante supérieure à 20%. Parallèlement, lors des premières réalisations sur site, une certaine efficacité acoustique avait été observée. Ainsi la première génération de revêtements peu bruyants avait vu le jour.

Après les avoir largement expérimentés sur réseau autoroutier, des formulations de granularité 0/10 mm ont été mises en œuvre en milieu urbain. Des problèmes liés à la pérennité de leurs performances acoustiques se sont alors rapidement révélés. Les BBD_r se colmatent rapidement en milieu urbain et perdent de ce fait leur capacité à absorber les ondes sonores.

Faisant suite à ces premiers résultats peu encourageants, les entreprises routières, en collaboration avec le LCPC, ont poursuivi leurs recherches qui les ont conduits à l'élaboration de revêtements en couches minces (BBTM) d'épaisseur inférieure à 4 cm présentant une porosité plus faible. Les recherches dans le domaine ayant montré que la dimension des granulats avait un fort impact sur l'émission sonore liée à la mise en vibration de la carcasse des pneumatiques, la profession s'est tout naturellement dirigée vers des formulations intégrant des granulats de petite dimension (0/6 mm, voire même 0/4 mm).

Ces formulations présentant néanmoins une certaine porosité, elles ont tendance à perdre de leur efficacité avec le temps, même si cela se produit moins rapidement qu'avec les revêtements drainants. Le choix a été fait de plus se concentrer sur l'effet de génération de bruit lié à la texture de surface et ainsi d'optimiser cette texture pour rendre des couches de roulement denses peu bruyantes tout en conservant des propriétés d'adhérence indispensables pour assurer une excellente sécurité par temps humide. C'est dans ce contexte général que les projets P2RN et ODSurf ont été élaborés et conduits dans le cadre de la collaboration franco-allemande DEUFRAKO.

Sachant qu'en Allemagne, les couches de roulement en béton de ciment étaient fortement développées, il a été décidé d'orienter nos recherches vers ce type de matériau. Toutefois, afin de classer en termes d'émission sonore ces chaussées « prototypes » parmi la gamme de revêtements dits « peu bruyants », il a été également décidé de conduire simultanément des expérimentations sur des BBTM, de conception plus traditionnelle, optimisée, afin de pouvoir établir des comparaisons pour des conditions de circulation urbaine. Au cours du projet ODSurf, les partenaires allemands se sont concentrés plus spécifiquement sur les formulations optimisées en béton de ciment hydraulique et les partenaires français sur les formulations plus conventionnelles en BBTM à faible granularité.

Objectifs

Un ensemble de documents a été publié au cours des dernières années, tant en France qu'en Allemagne et plus largement en Europe afin d'établir une stratégie de réduction du bruit lié au transport routier d'au moins 30% pour les prochaines années. Plusieurs villes à travers l'Europe sont intéressées par la mise en place de surfaces de chaussée peu bruyantes afin de répondre aux exigences de la Directive Européenne de 2002. La réduction du bruit à la source est encore la meilleure approche pour réduire les nuisances sonores ressenties par les riverains. Sachant qu'une partie importante de l'émission sonore est due au bruit de roulement (même en milieu urbain), deux solutions s'offrent à nous, réduire la part même due au pneumatique et réduire celle due au revêtement de chaussée. Dans ce projet nous concentrerons nos efforts autour de la chaussée.

Dans le passé, des revêtements poreux ont été testés en milieu urbain. Même si leurs effets étaient substantiels lors de la mise en œuvre, les phénomènes de colmatage réduisaient considérablement les gains après quelques années de service. Ces problèmes étaient principalement imputés à la faible vitesse des véhicules qui ne pouvait assurer l'auto-nettoyage de la couche poreuse. De ce fait, en environnement urbain, il devenait urgent de faire des recherches sur des structures de chaussée dense à faible bruit. Quelques projets intéressants ont montré la faisabilité d'un tel type de surface sans pour cela que des performances comparables à des structures poreuses aient pu être réellement atteintes.

Conformément aux résultats obtenus dans le cadre du précédent projet DEUFRAKO-P2RN « *Prediction and Propagation of Rolling Noise* » [1], il est possible de concevoir théoriquement une structure de chaussée dense produisant une émission sonore minimale comparable à un revêtement poreux (BBDr) monocouche. Toutefois, la texture de chaussée obtenue étant relativement différente des textures de chaussée conventionnelles, il n'est pas possible de construire, en place, cette structure de façon conventionnelle avec des matériaux eux-mêmes conventionnels.

L'aspect de la préfabrication devient alors très important si l'on souhaite garantir une qualité constante de la couche de surface indépendante des conditions météorologiques. De plus, de telles solutions permettent un meilleur entretien, notamment en termes de remplacement lors d'intervention de concessionnaires. Des solutions existent actuellement mais demandent à être optimisées. L'étude de ces diverses solutions fera l'objet d'une partie du projet. Cette partie conception et fabrication est principalement prise en charge par la partie allemande. Les partenaires français sont plus particulièrement impliqués sur l'aspect modélisation et l'aspect validation expérimentale après mise en œuvre.

Enfin, une des applications attendue sera la mise à jour et l'extension de la base de données DEUFRABASE, précédemment développée dans le cadre du précédent projet DEUFRAKO-P2RN.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le projet est structuré en 4 Tâches :

- Tâche 1 : Management du projet
- Tâche 2 : Production de surfaces de chaussée denses optimales
- Tâche 3 : Amélioration des modèles de prévision du bruit et de la DEUFRABASE
- Tâche 4 : Valorisation et dissémination des résultats

Synthèse des résultats

1. Introduction

Ce rapport final concerne les travaux réalisés au cours des quatre années du projet ODSurf (Novembre 2011-Novembre 2015). Bien que prévu à l'origine sur trois ans, ce projet a fait l'objet d'un avenant en juin 2014 étendant la durée du contrat jusqu'au 18 Janvier 2016.

Ce rapport fait la synthèse des travaux réalisés dans chaque Tâche et par chaque partenaire. Il mettra plus particulièrement l'accent sur les résultats obtenus par les partenaires français financés par l'ADEME. Néanmoins quelques informations seront fournies sur les principaux résultats des travaux réalisés par les partenaires allemands.

Nota : Les travaux de la tâche n°3 relative à la modélisation multi-échelle du contact dynamique à partir d'un modèle de contact multi-aspérités et à la modélisation de l'effet dièdre ayant été réalisés par deux post-doctorantes et un doctorant étrangers (Mlles B. Tian, L. Pahlevani et M. B. Wang), leurs contributions sont rédigées en langue anglaise.

2. Tâche n°1 : Management du projet

L'objectif principal de cette tâche concerne les relations entre les divers partenaires en relation avec les secrétariats de l'ADEME et du DEUFRAKO. Afin d'atteindre ces objectifs, au cours de ces quatre années, diverses réunions se sont déroulées :

- 1^{ère} réunion du consortium français à Paris (Ifsttar) le 22 Mars 2012 ;
- 2^{ème} réunion du consortium français à Boulogne-Billancourt (Société Colas) le 05 Novembre 2012 ;
- Réunion de cadrage avec la partie allemande (BAST) à Bergisch-Gladbach les 22 et 23 Novembre 2012 ;
- Réunion officielle franco-allemande de démarrage du projet (BAST) à Bergisch-Gladbach les 24 et 25 Janvier 2013.

- 3^{ème} réunion du consortium français à Rueil-Malmaison (Société Eurovia) le 05 Septembre 2013 ;
- 2^{ème} Réunion officielle franco-allemande (Société Colas) à Paris les 21 et 22 Novembre 2013 ;
- 4^{ème} réunion du consortium français à Marne-la-Vallée (Ifsttar) le 09 Octobre 2014 ;
- 3^{ème} Réunion officielle franco-allemande (RWTH - Université d'Aix-la-Chapelle) à Aix-la-Chapelle les 16 et 17 Octobre 2014 ;
- 5^{ème} réunion du consortium français à Marne-la-Vallée (ENPC) le 28 Septembre 2015 ;
- Séminaire final franco-allemand à Bron (Ifsttar) les 03 et 04 Décembre 2015.

A l'exception de la réunion de cadrage dans les locaux de la BAST dédiée principalement à l'organisation de la réunion officielle de démarrage et du séminaire de clôture dans les locaux de l'Ifsttar à Bron, chaque réunion a fait l'objet d'un compte-rendu détaillé.

De plus, les relations avec le secrétariat du DEUFRAKO ont été poursuivies jusqu'à fin 2012 par des contacts réguliers et par notre participation à la réunion du Steering Committee qui s'est tenue à Strasbourg le 31 mai 2012.

3. Tâche n°2 : Production de surfaces de chaussée denses optimales

Conformément aux résultats obtenus dans le cadre du précédent projet DEUFRAKO-P2RN « Prediction and Propagation of Rolling Noise » [1], une surface de chaussée dense présentant une texture optimisée peut atteindre théoriquement des niveaux sonores au passage d'un véhicule de l'ordre de ceux obtenus pour un revêtement poreux (drainant) monocouche (cf. *Tableau 1*).

Tableau 1 : (*Revêtement français ; **Revêtement allemand ;
°Vitesse de référence française ; °°Vitesse de référence allemande)

Niveau sonore en dB(A) à 80 km/h°°	72,3	71,3	72,9	75,3	77,1
Niveau sonore en dB(A) à 90 km/h°	73,8	72,8	74,4	76,8	78,6
Type de surface	Optimum (Prevision théorique)	BBDr 0/6* monocouche	BBDr 0/8** monocouche	BBSG 0/10 Référence française	Référence allemande

Dans le cadre du projet P2RN, les techniques et matériaux conventionnels n'ont pas permis de mettre en œuvre ce revêtement expérimental. Un des objectifs de ce nouveau projet est donc de développer un nouveau procédé permettant de réaliser sur site cette texture théorique identifiée dans P2RN. De nouveaux concepts, en termes de matériaux et de mise en œuvre sont analysés par nos collègues allemands.

Une surface de chaussée « prête à l'emploi » doit répondre à plusieurs critères dont la sécurité et la durabilité sont probablement les plus importants. Ce projet traite plus spécifiquement de l'aspect acoustique, mais néanmoins, ces aspects ne seront pas pour autant oubliés.

Différentes techniques sont expérimentées par nos collègues allemands. Le paragraphe suivant donnera un rapide aperçu des techniques développées dans le cadre des appels d'offre lancés et financés par la BAST. Pour des raisons de dépôt de brevet lié à certaines techniques, il ne nous sera pas possible de fournir plus de renseignements. Ces diverses techniques seront mises en place sur divers sites expérimentaux en Allemagne afin d'être testées et comparées aux techniques françaises plus « conventionnelles ».

Dans cette tâche, la participation française regroupe les entreprises Colas S.A. et Eurovia Management. Les contributions de chacun des partenaires sont détaillées ci-dessous.

3.1. Résumé des travaux allemands : appel d'offre BAST

Afin de mener à bien ce projet, nos collègues allemands ont choisi de consulter un certain nombre de partenaires universitaires et industriels capables de dimensionner et produire des structures de chaussée industrielles « préfabriquées » à base de matériaux non conventionnels. Le financement a été obtenu auprès du Ministère des Transports allemand dans le cadre d'un projet national plus général recentré sur les transports silencieux.

Un appel d'offre a donc été lancé (*cf. Figure 1*). Ses objectifs majeurs sont :

- Recherche de technologies innovantes en matière de structuration de la couche de roulement ;
- Apporter de l'innovation dans la construction routière ;
- Conserver des caractéristiques d'adhérence suffisantes comparables à des chaussées de conception traditionnelle ;
- Mise en place des solutions retenues sur site réel.

Les projets retenus sont les suivants :

- Développement d'une couche de roulement de chaussée à faible bruit en utilisant des structures préfabriquées basées sur la technique des bétons de ciment à haute performance (UHPC). La texture de surface devrait être proche de celle déterminée lors du précédent projet P2RN (*cf. Figure 1*). Contribuent à ce projet l'Université de Kassel, le bureau d'étude Müller-BBM et la Société Otto Quast.
- Développement d'une couche de surface de chaussée composée de pavés en béton de ciment peu bruyants. Contribuent à ce projet l'Université de Kassel, l'Université Technique de Munich et le bureau d'étude Müller-BBM.
- Développement d'une couche de surface de chaussée peu bruyante, innovante, utilisant des matériaux synthétiques (Procédé LIDAK). Ce projet est porté par l'Université d'Aix-la-Chapelle.

Les trois procédés retenus ont été mis en œuvre afin d'être testés, sur divers sites expérimentaux :

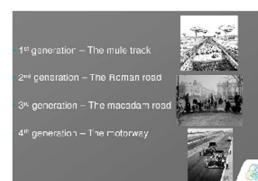
- Sur une nouvelle aire de repos de l'autoroute A45 près de Meinerzhagen (Rhénanie-du-Nord-Westphalie) pour le procédé UHPC¹ ;
- Dans une rue du centre-ville de Melle (Basse-Saxe) pour les pavés en béton de ciment poreux ;
- Sur un site au carrefour des autoroutes A44/A46 près de la ville de Jüchen ((Rhénanie-du-Nord-Westphalie) pour le procédé LIDAK.

Des essais, de texture, de bruit, et d'adhérence ont été réalisés sur les trois produits dans un premier temps, en laboratoire et par la suite sur site afin d'être comparés lorsque les conditions expérimentales le permettent aux revêtements allemands « classiques » ainsi qu'aux revêtements innovants français.

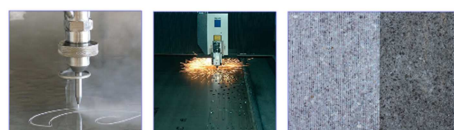
¹ Pour des raisons d'accessibilité et de sécurité, seul ce site a pu être instrumenté avec les équipements de l'Ifsttar.

New technologies for new roads

Roads have a long history of development. We count four generations of roads from the mule track to the motorway. But now it is time for a further step in road construction.



The road of the future will be produced with new technologies and materials. For a new dense road surface, a very silent texture has been developed in the framework of the DEUFRAKO (germ.-fr. cooperation) project P2RN (Prediction and Propagation of Rolling Noise). As a material for this kind of road surface, high performance concrete (HPC) might be used. We are now searching technologies for the structuring of HPC.



Potential technologies for the structuring e.g. are:

- Grinding
- Water jet cutting
- Etching
- Laser cutting ...

The technologies shall be suitable to structure large areas with reasonable time and cost. Curvilinear grooves yielding a similar structure size of the plateaus are also conceivable. For the competition, tenderers send in a short description of how they intend to structure three HPC slabs of 30 x 30 cm² together with references to their previous work.

BAST will measure the textures of all slabs and the jury will choose those technologies that render the surface texture most similar to the P2RN surface.

Our international jury will choose a maximum of 10 best tenderers who will structure three slabs each. These tender will be refunded with 15.000 € each.

It is planned that the winner(s) will have the opportunity to demonstrate the potential of their technologies in a new project on a large scale.

Submission of proposals is open until 31st Mai 2012.

Structuring takes place between 31st July 2012 and 30th September 2012.

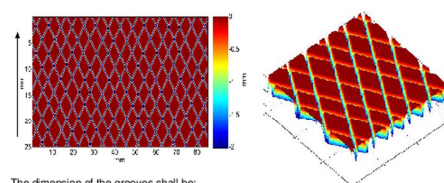
The winner(s) will be declared in November 2012.



Competition: Structuring of concrete surfaces

The German Federal Highway Research Institute (BAST) is announcing a competition for the best technology to structure road surfaces made from High Performance Concrete (HPC). As outlined above, we are seeking especially technologies that are new to the road construction sector.

Approved applicants will structure three HPC slabs (30 x 30 cm²) with a technology of their choice. The final texture profile shall be the following:



The dimension of the grooves shall be:

- width: 2 mm
- depth: 2 mm min.

They shall be diagonal with an angle of about 60° and irregularly *randomly* spaced with distances between min. 4 – max. 7 mm.

Figure 1 : Texte de l'appel d'offre rédigé par la BAST

3.1.1. Résumé des résultats du projet UHPC [2]

Dans ce projet, les acteurs sont partis du principe que les chaussées revêtues en béton de ciment étaient plus durables. Cependant elles étaient assez bruyantes. Lors de précédents projets LeiStr1 [3] et ITARI [4]), il a été montré que moyennant une texture adaptée, les revêtements à base de béton de ciment pouvaient apporter une atténuation sonore de l'ordre de 5 dBA par rapport au revêtement de référence allemand². Afin d'obtenir ce résultat, il est nécessaire de concevoir une texture présentant une structure fine avec des dimensions de l'ordre de quelques millimètres (cf. Figure 1). De telles structures ne peuvent être envisagées qu'avec des bétons produits avec des granulats très fins comme le « UHPC » (Béton à ultra haute performance). Dans ce projet il a été fait le choix de travailler avec de larges plaques de dimension 5m x 3,5m.

3.1.1.1. Conception de la texture de surface

La texture de surface a été imaginée dans le cadre d'un précédent projet [3] et optimisée théoriquement par l'utilisation du logiciel SPERoN [5]. La même procédure d'optimisation avait également été utilisée lors du projet P2RN [1]. En revanche, lors de ce dernier projet, la mise en œuvre de cette texture avait été faite en utilisant de la résine et n'avait malheureusement pas fourni le résultat escompté à cause de problèmes de mise en œuvre.

Après optimisation théorique de la texture, et plus de 540 types de surfaces testées, la solution choisie est celle représentée en Figure 2(a). Pour sa réalisation, les propriétés du béton UHPC ont dû également être adaptées afin de pouvoir réaliser la texture sélectionnée. La Figure 2(b) représente une plaque d'essai réalisée en laboratoire.

² La valeur de référence est 85,2 dBA. Elle est mesurée avec un véhicule léger à 120 km/h sur un Béton Bitumineux dense de granularité 0/11 (DAC 0/11). La capacité d'un revêtement à atténuer le bruit comparé à cette valeur de référence est noté D_{stro} . Si cet indicateur est négatif, cela signifie une réduction du bruit. A titre comparatif, dans la même configuration (véhicule/vitesse), le niveau sonore sur le revêtement de référence français (BBSG 0/10) serait de 82 dBA.

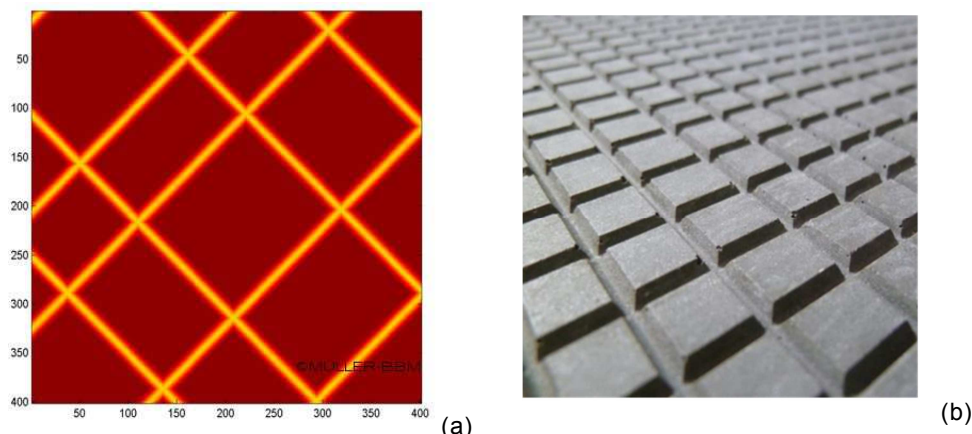


Figure 2 : (a) : Texture théorique ; (b) : Réalisation de la plaque d'essai

Après différents tests en laboratoires concernant également les autres caractéristiques de surface comme l'adhérence, un chantier expérimental a été réalisé sur une nouvelle aire de repos en construction de l'autoroute A45 près de Meinerzhagen (Rhénanie-du-Nord-Westphalie). Sur la Figure 3, nous voyons la planche d'essai composée de 6 plaques mises bout à bout avec une grande précaution afin d'éviter autant que possible des discontinuités au niveau des joints entre plaques. La dimension totale de la planche d'essai est donc de 30 m x 3,5 m.



Figure 3 : Réalisation de la planche d'essai sur l'autoroute A45

3.1.1.2. Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques ont été réalisées à la fois par le partenaire allemand Müller BBM et par l'Ifsttar à la fin du chantier en novembre 2014. Le partenaire allemand a réalisé ses mesures à la fois par les méthodes CPB (mesure au passage d'un véhicule : microphone situé à 7m50 de l'axe de la voie et à 1m20 de hauteur) et CPX (mesure à proximité du pneumatique à 20 cm du pneumatique) tandis que l'Ifsttar n'a pu analyser que les mesures CPX à cause d'un bruit de fond relativement important le jour des mesures. La description des essais ainsi que les résultats des mesures de bruit et de texture de l'Ifsttar sont détaillés aux paragraphes 3.3.1.3 et 3.3.4.3. Pour des mesures de sécurité les passages de véhicule n'ont pu être effectués qu'entre 40 et 70 km/h. Au-delà de ces vitesses les valeurs ont été extrapolées et sont notées en italique dans le Tableau 2 de résultats.

Lors de ses mesures le bureau d'étude Müller-BBM a réalisé des essais dans les deux traces de roue. Ils ont ainsi mis en évidence une différence de niveau sonore de l'ordre de 2 dBA par les deux méthodes de mesure qu'ils attribuent à une légère différence de rugosité entre les deux traces.

Les résultats obtenus avec la **méthode au passage (CPB)** sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Résultats des mesures au passage d'un véhicule (CPB)

Vitesse en km/h	Trace de roue plus « lisse »		Trace de roue plus « rugueuse »		L _{AFmax} moyen en dBA
	L _{AFmax} en dBA	Intervalle de confiance à 95%	L _{AFmax} en dBA	Intervalle de confiance à 95%	
40	68,7	0,7	70,0	1,0	69,4
50	70,8	0,4	72,6	0,6	71,7
60	72,4	0,3	74,6	0,4	73,5
70	73,8	0,4	76,4	0,6	75,1
80	75,0	0,6	77,9	0,8	76,5
90	76,1	0,8	79,3	1,1	77,7
100	77,1	1,0	80,5	1,3	78,8
110	77,9	1,1	81,6	1,5	79,8
120	78,7	1,3	82,5	1,7	80,6

Les résultats obtenus avec la **méthode en continu** pratiquée avec une remorque anéchoïque (cf. Figure 4) sont présentés dans le Tableau 3 où ils sont comparés à d'autres revêtements peu bruyants mesurés avec la même technique à la même vitesse de 50 km/h.

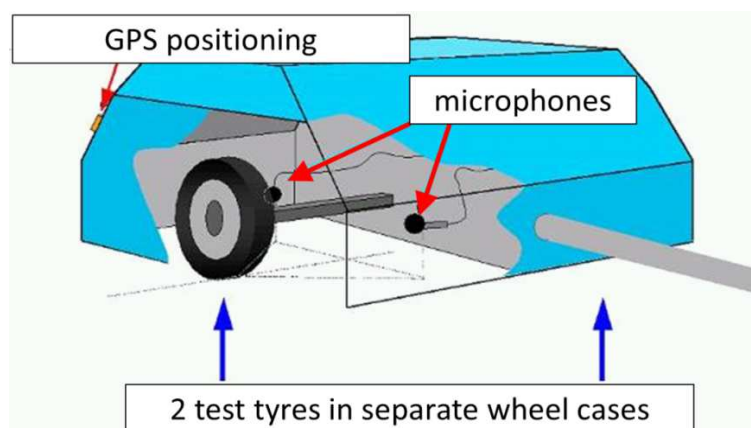


Figure 4 – Schéma de la remorque anéchoïque de la société Müller-BBM. Chacun des deux pneumatiques est respectivement représentatif d'un pneumatique de véhicule léger et d'un pneumatique de véhicule lourd en termes de bruit produit

Tableau 3 : Résultats des mesures CPX à la vitesse de 50 km/h

Revêtements ³	Niveaux CPX en dBA Pneumatique véhicule léger	Niveaux CPX en dBA Pneumatique véhicule lourd
ZWOPA 0/8	86,3	87,6
LOA 5D	88,1	90,0
DSH-V5	88,4	90,8
SMA 8 LA	89,6	90,3
AC 8 DS	90,9	91,7
AC 11 DS	92,3	93,4
UHPC « lisse »	90,7	92,8
UHPC « rugueux »	92,4	93,1
UHPC (Moyenne)	91,6⁴	93,0

D'après le tableau 2, les résultats CPB montrent qu'en fonction des traces de roue, la réduction du niveau sonore à 120 km/h par rapport à la référence allemande (85,2 dBA) se situerait après extrapolation entre 3 et 6,5 dBA (en moyenne autour de 5 dBA). Concernant la méthode CPX à 50 km/h, la réduction enregistrée par rapport au revêtement AC 11 (Référence allemande) est moins importante puisqu'elle se situe entre 1 et 2 dBA pour les véhicules légers. Pour les véhicules lourds la différence, elle serait inférieure au décibel en valeur moyenne.

3.1.1.3. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la texture imaginée lors de précédents projets a pu être réalisée avec un matériau de type béton de ciment spécifiquement formulé et optimisé pour s'adapter aux conditions de mise en œuvre. En termes de niveaux sonores, les résultats obtenus sont conformes à ceux attendus notamment par comparaison aux références allemandes. Les comparaisons par rapport aux revêtements français sont détaillées aux paragraphes 3.3.2.3 pour la texture et 3.3.4.3 pour les mesures de bruit de contact pneumatique-chaussée.

S'agissant d'une première réalisation en site réel, des améliorations au niveau de la mise en œuvre sont encore possible ce qui devrait, par voie de conséquence, pouvoir améliorer les performances acoustiques.

3.1.2. Résumé des résultats du projet « pavés de béton en ciment poreux » [6]

Dans l'objectif de réduire les nuisances sonores en milieu urbain, diverses solutions peuvent être envisagées. Outre Rhin, un grand nombre de chaussées urbaines sont déjà revêtues de pavés de divers types. Les raisons de mise en place de ces pavés sont souvent liées à un problème de réparation de chaussée après travaux sur la chaussée. Toutefois, les pavés sont bruyants. Dans ce projet l'objectif a été de travailler sur des solutions peu bruyantes tout en conservant les avantages des solutions antérieures en termes notamment de réparation.

³ Ces revêtements considérés en Allemagne « à faible bruit » sont pour une part importante répertoriés dans la DEUFRABASE

⁴ A titre de comparaison, dans les mêmes conditions de mesure, le revêtement français de référence (BBSG 0/10) produit un niveau sonore moyen voisin de 90 dBA

3.1.2.1. Conception de pavés en béton de ciment peu bruyants

Dans une première étape, un système à texture optimisée afin de réduire les phénomènes vibratoires et le phénomène de pompage d'air avait été envisagé. Des calculs ont été réalisés à cet effet à partir du logiciel SPERON [5] développé par la société Müller-BBM partenaire du projet. Ce calcul tenait compte également des critères suivants : adhérence, résistance au roulement pour optimiser la consommation et une production au meilleur coût.

Une première solution avec texture optimisée (cf. Figure 5a) a été élaborée et mise en œuvre sur un démonstrateur. Un gain de 2 dBA a été trouvé par rapport aux pavés classiques à la vitesse urbaine de 30 km/h, cependant le niveau sonore était encore trop élevé par rapport aux objectifs fixés. Une seconde solution a donc été envisagée en agissant sur l'absorption du matériau. Des pavés en béton de ciment poreux à granularité fine ont donc été envisagés, réalisés et expérimentés dans une rue du centre-ville de la commune de Melle en Basse-Saxe (cf. Figure 5b).



Figure 5 : Solution avec des pavés texturés (a) ; Solution avec des pavés en béton de ciment poreux (b)

3.1.2.2. Résultats

Les mesures de bruit ont été effectuées par la société Müller-BBM avec la technique au passage (CPB) à faible vitesse (30 km/h) compatible avec des conditions de conduite liées à la configuration du site⁵. Un niveau L_{Amax} voisin de 59 dBA a été mesuré. Ceci correspond à une réduction de l'ordre de 7 dBA par rapport à la référence allemande (DAC 0/11)⁶.

Ces premiers résultats semblent encourageants. Dans des situations urbaines particulières où la vitesse est limitée, cette solution peut être une alternative intéressante.

3.1.3. Résumé des résultats du projet LIDAK [7]

Après une étude approfondie des différents mécanismes de génération de bruit de roulement ainsi que de l'impact d'un grand nombre de formulation de revêtements de chaussées développées en Allemagne, les partenaires de l'Isac (Institut d'Ingénierie des routes) de l'Université d'Aix-la-Chapelle ont conçu une couche de roulement à base de matériau synthétique (LIDAK) permettant entre autre de réduire les phénomènes vibratoires, source d'une part non négligeable de l'émission sonore lors du roulement. La couche synthétique de 10 mm d'épaisseur est prévue d'être disposée sur une couche de base poreuse de 40 mm d'épaisseur présentant des bonnes propriétés d'absorption acoustique sur la gamme 800-2500 Hz. (cf. Figure 6).

⁵ Etant donné les conditions de site (proximité des habitations et longueur de la rue trop courte), pour des raisons de sécurité, il n'a pas été possible de réaliser des mesures CPX.

⁶ Par rapport au BBSG 0/10 de référence en France, dans les mêmes conditions de vitesse et avec des réserves nécessaires liées à une forte extrapolation, l'atténuation ne serait que de l'ordre de 3 dBA



Figure 6 : Couche de matériau synthétique (en blanc) sur la couche poreuse (en noir)

3.1.3.1. Conception du matériau

Afin de prendre en compte, outre les caractéristiques acoustiques dont l'objectif était de diminuer le niveau sonore de l'ordre de 6-7dBA, les caractéristiques liées à la drainabilité de la couche de roulement et donc par voie de conséquence de l'adhérence, un grand nombre de prototypes de structures de surfaces ont été étudiées. Douze variantes ont été finalement retenues pour être testées avec les moyens expérimentaux de la BAST permettant de mesurer en laboratoire le bruit de roulement tant avec des pneumatiques de véhicules légers que de poids lourds.

3.1.3.2. Résultats des expérimentations en laboratoire et in situ

En laboratoire (cf. Figure 7), les tests ont été conduits à des vitesses comprises entre 60 et 120 km/h.



Figure 7 : Matériau positionné sur le banc de mesure de la BAST

Parmi les 12 variantes, l'une d'entre elles présentait les meilleurs résultats (environ 78 dBA à 120 Km/h en méthode CPB⁷ et au voisinage de 100 dBA en méthode CPX). Ceci représente un gain de 6 à 7 dBA par rapport à la référence nationale allemande.

Suite à ces essais en laboratoire, deux bandes de roulement ont été mise en place sur un site au carrefour des autoroutes A44/A46 près de la ville de Jüchen en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Les mesures ont été effectuées par la technique CPX avec une remorque anéchoïque équipée de deux pneumatiques respectivement représentatifs d'un pneumatique de véhicule léger et d'un pneumatique de véhicule lourd en termes de bruit de roulement produit (cf. Figure 8).

⁷ A titre indicatif, pour les mêmes conditions de vitesse, la référence française en BBSG 0/10, produit un niveau sonore voisin de 82 dBA



Figure 8 : Matériau mis en place sur site avec la remorque de mesure

Des résultats intéressants ont été trouvés tant pour le pneumatique de véhicule léger (6 dBA de réduction par rapport au Gußasphalt⁸) que pour le pneumatique de véhicule lourd (3 dBA par rapport au Gußasphalt).

Ces premiers résultats sont encourageants mais demandent à être confirmés notamment pour des conditions réelles de circulation plus agressive. Des tests de durabilité devront être effectués en parallèle car l'expérience en matière de tenue dans le temps de matériaux poro-élastiques n'a jusqu'à présent pas été couronnée de succès [8].

3.1.4. Premières conclusions sur les expériences allemandes

Parmi les trois projets retenus, seul le projet LIDAK nécessite encore des recherches avant de pouvoir le mettre en place sur chaussée réelle soumise à un trafic urbain traditionnel. En revanche, les deux autres chaussées expérimentales à base de béton de ciment dense (Projet UHPC) et à base de pavés en béton de ciment poreux ont pu être mises en place sur sites réels circulés et testées dans des conditions se rapprochant de leur utilisation future.

Au cours de ces tests, outre les caractéristiques acoustiques en termes de bruit de roulement, les caractéristiques d'adhérence ont été également testées. Dans l'ensemble des cas, l'adhérence par temps humide est satisfaisante. Ceci provient d'une part, de la microtexture du béton de surface et d'autre part, des canaux séparant les divers motifs ou de la porosité des pavés qui assurent une bonne évacuation du film d'eau en surface de la chaussée. Un bon coefficient de frottement transversal a été mesuré.

Concernant les résultats acoustiques, ils sont conformes aux attentes des partenaires allemands et conduisent à des améliorations substantielles de plusieurs décibels par rapport aux valeurs de références allemandes.

3.2. Contribution française : optimisation des couches de roulement conventionnelles

Au cours des dernières années, les entreprises françaises se sont impliquées de façon importante dans des programmes de recherche relatifs à l'amélioration des caractéristiques acoustiques des couches de roulement vis-à-vis du bruit de contact pneumatique-chaussée. Les deux sociétés partenaires du projet ont mis à disposition du consortium divers chantiers sur lesquels sont répandues des structures de chaussée innovantes à faible bruit afin de les tester et de comparer à terme leurs caractéristiques à celles des revêtements français de référence et des structures innovantes allemandes brièvement présentées ci-dessus.

⁸ Le Gußasphalt répertorié dans la DEUFRABASE est un matériau communément utilisé en Allemagne. Les niveaux sonores produits sur ce revêtement sont proches du DAC 0/11

3.2.1. Contribution de la Société Colas

Au cours de ce projet, la contribution de la Société Colas s'est résumée à :

- La présentation de la synthèse du savoir-faire Colas en matière d'enrobé phonique au cours de la réunion bilatérale de démarrage du projet les 24-25 janvier 2013 dans les locaux de la BAST en Allemagne. Au cours de cette réunion, ont été plus particulièrement présentées les différentes gammes d'enrobés phoniques depuis les années 1990, les mesures et modèles sur un enrobé Nanosoft ainsi que les mesures de chantier.
- Faisant suite à cette réunion ainsi qu'aux deux réunions du consortium français, cinq échantillons en enrobé : BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu), BBTM (Béton Bitumineux Très Mince), ES (Enduit Superficiel), Colgrip et Nanosoft ont été réalisés en vue de mesures de texture 3D pouvant alimenter les futurs modèles de bruit de roulement détaillés au cours des prochains paragraphes. Les échantillons sont représentés sur la Figure 9. A noter que ces échantillons ont dû être ternis (vieillesse accélérée aux UVs) car la surface des enrobés préparés en laboratoire est spéculaire et sature les capteurs de certains appareils de relevé de texture.
- La chaussée à faible bruit de roulement retenue par Colas est réalisée avec un revêtement Nanosoft (formulation granulaire 0/4 adaptée). Constituée d'une 2x2 voies, en milieu péri-urbain (cf. Figure 10), cette chaussée a été mise en œuvre en 2009 et depuis est circulée. L'Ifsttar a procédé en Juillet 2014 à des relevés de texture 3D, d'absorption acoustique, des mesures de bruit au passage et en champ proche du pneumatique mesuré suivant la méthode CD-ISO 11819.2 [9] pour des vitesses allant de 40 à 90 km/h. Le niveau de bruit relevé à 50 km/h, est d'environ 88 dBA. Les résultats de mesure sont détaillés aux paragraphes 3.3.2.3 pour la texture, 3.3.3.3 pour l'absorption et 3.3.4.3 pour les mesures de bruit de contact pneumatique-chaussée.
- Les différentes mesures ont servi à alimenter les modèles de bruit développés par les équipes de l'Ifsttar.



Figure 9 : Echantillons de revêtements
 (a) : BBSG ; (b) : BBTM ; (c) : Colgrip; (d): Enduit Superficiel ES; (e): Nanosoft



Figure 10 : Revêtement Nanosoft à Mouvaux

3.2.2. Contribution de la Société Eurovia Management

3.2.2.1. Chantier expérimental de Villeneuve sur Lot (EUROVIA Management)

Les modèles de prévision du bruit routier, développés dans la tâche 3 du présent projet, s'appuient sur les mesures des caractéristiques de surface des revêtements routiers telles que la texture et les propriétés acoustiques.

La sélection d'un site expérimental destiné à évaluer ces modèles de prévision n'est pas à prendre à la légère. Les méthodes de mesures in situ de ces caractéristiques imposent d'une part des conditions de site particulières⁹ portant essentiellement sur la géométrie du tracé et d'autre part des conditions de réalisation impliquant la neutralisation du trafic routier et des conditions météorologiques favorables (pas de précipitation durant les dernières 48 heures précédant les mesures). Dans les faits, de très nombreux sites expérimentaux dérogent aux contraintes de sites, notamment en milieu urbain.

Dans le cadre du projet ODSurf, EUROVIA a mobilisé son réseau technique afin d'identifier un chantier satisfaisant aux critères de réalisations des mesures. Ce chantier, réalisé en 2013, est présenté au paragraphe 3.2.2.1.1. Les investigations in situ préliminaires et l'organisation des expérimentations avec l'IFSTTAR sont présentés au paragraphe 3.2.2.1.2.

3.2.2.1.1 Réalisation du chantier

Cette section du rapport s'attache à présenter le chantier expérimental de Villeneuve-sur-Lot, en fournissant des informations géographiques précises, une description du site expérimental, le calendrier des opérations menées dans le cadre du projet ODSurf, la description des produits testés et une présentation du déroulement des travaux et de leurs contrôles. Cette section débute en soulignant l'implication des acteurs qui ont rendu possible ce projet.

Parties prenantes

La réalisation du chantier expérimental résulte de l'implication des acteurs suivants :

- Conseil général du Lot-et-Garonne ;
- EUROVIA Aquitaine – Agence d'Agen ;

⁹ A titre d'exemple, la méthode de mesure du bruit de roulement dite au passage VI (véhicule isolé), définie par la norme européenne NF EN ISO 11819-1 [10], indique que le site doit être exempt de tout obstacle réfléchissant (bâtiment, arbre, glissières de sécurité, etc.). Son profil en travers doit être plat, sans grands déblais ni remblais (dénivelé maximum de 0,50 m). Son profil en long doit être rectiligne sur au moins 200 mètres de part et d'autre du point de mesure et ne doit pas présenter de pente significative (inférieure à 2 %). Les accotements doivent être dérasés. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à la note CFTR N°20 [11]

- EUROVIA Management – Direction technique déléguée Sud-Ouest ;
- EUROVIA Management – Centre de Recherche ;
- IFSTTAR LAE ;
- ADEME.

Localisation du site expérimental

Le chantier expérimental se situe dans le département du Lot-et-Garonne (47) sur la commune de Villeneuve-sur-Lot (cf. Figure 11). Il a été réalisé par EUROVIA Aquitaine – Agence d'Agen, dans le cadre de travaux neufs sur la RD 911 – déviation Sud-Ouest de Villeneuve sur Lot (cf. Figure 12).

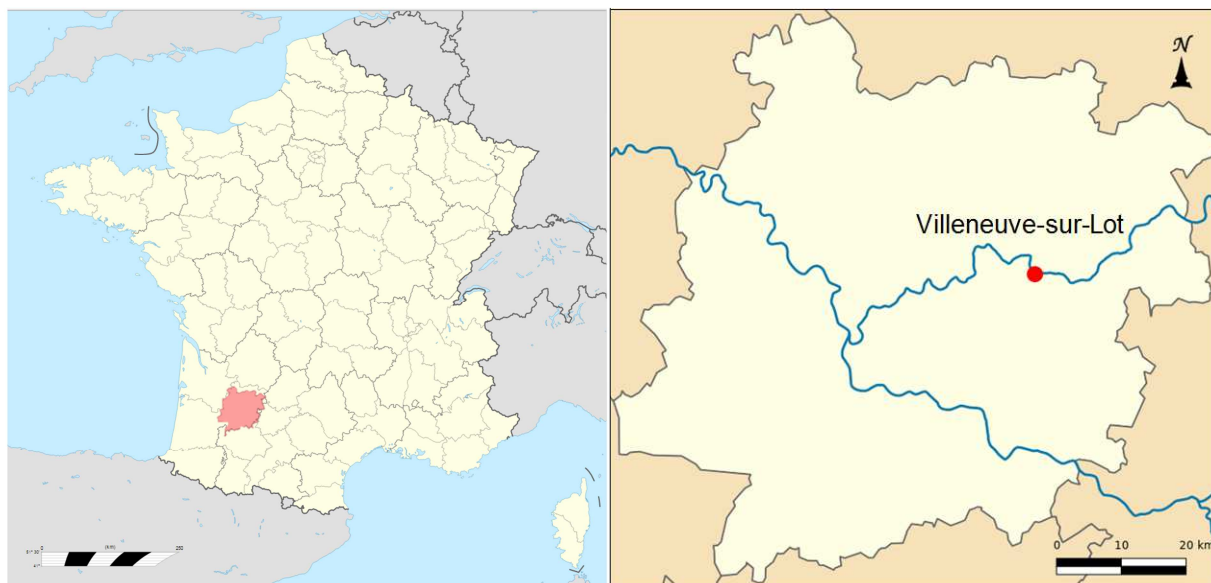


Figure 11 : Département du Lot-et-Garonne et commune de Villeneuve-sur-Lot

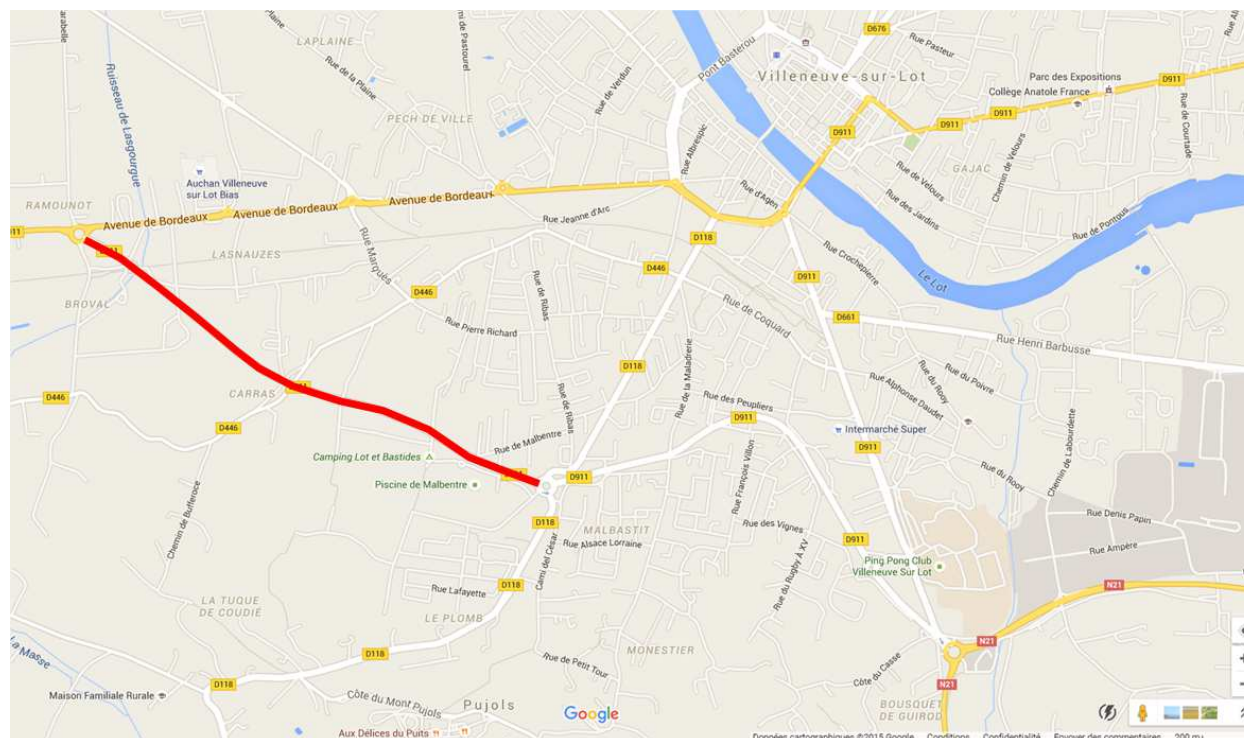


Figure 12 : Implantation du chantier expérimental sur la RD 911 (Données cartographiques ©2015 Google)

Description des planches expérimentales

Le chantier expérimental a conduit à réaliser 3 planches destinées au projet ODSurf :

- un produit VIAPHONE de référence ;
- un produit VIAPHONE X1 avec un additif phonique de densité 0,1 ;
- un produit VIAPHONE X2 avec un additif phonique fibreux.

Ces produits sont mis en œuvre sur des distances supérieures à 200 mètres dans les zones les plus dégagées afin de respecter les contraintes de sites induites par les méthodes d'essais visées dans le projet. L'implantation des différentes planches expérimentales sur la section 1 de la RD 911 est présentée sur la Figure 13.

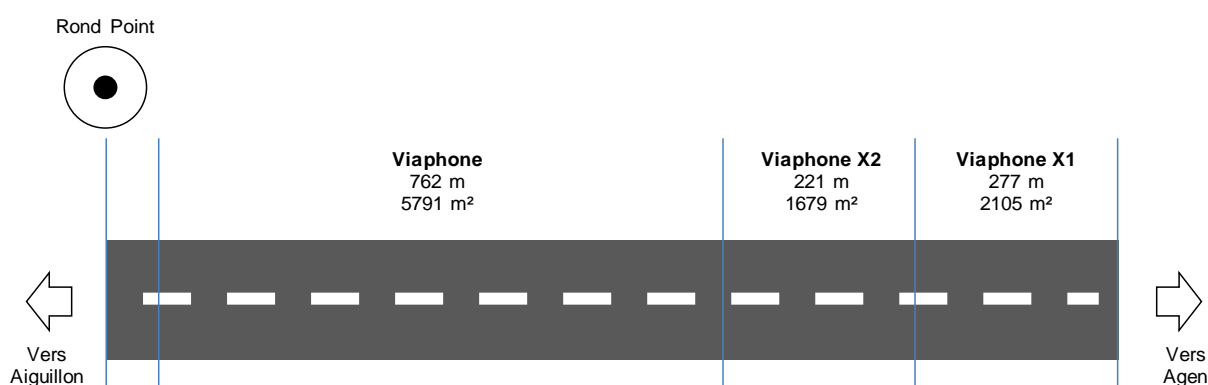


Figure 13 : Implantation des trois planches expérimentales sur la section 1 de la RD 911

Calendrier des opérations de travaux et de mesure

Les principales échéances du chantier expérimental sont les suivantes :

- | | |
|---|------------------|
| • élaborations des formules de VIAPHONE en laboratoire | septembre 2013 ; |
| • faisabilités de fabrication en centrale pour le VIAPHONE X1 et X2 | octobre 2013 ; |
| • mise en œuvre des planches de VIAPHONE | novembre 2013 ; |
| • auscultation par imagerie RADAR | novembre 2013 ; |
| • apparition de désordres sur la planche de VIAPHONE X1 | décembre 2013 ; |
| • réfection de la planche de VIAPHONE X1 | mai 2014 ; |
| • mesure acoustiques préliminaires | mai 2014 ; |
| • mesure acoustiques et de texture (avec IFSTTAR) | septembre 2014. |

Description des procédés phoniques

Les procédés mis en œuvre par EUROVIA sur le chantier de la RD 911 sont des procédés VIAPHONE®. La mention X (X1 et X2) indique que le procédé est dans une phase expérimentale. Lors de leur qualification préliminaire en laboratoire, l'ensemble des procédés a satisfait aux critères d'essais listés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Critères employés dans l'élaboration des formules du chantier de la RD 911

Essai	Critère
PCG	20 % < Valeur < 25 %
Tenue l'orniérage	Valeur < 20 %
Tenue à l'eau (ITSR)	Valeur > 75 %
Tube de Kundt	Valeur optimale

Procédé VIAPHONE®

Le procédé VIAPHONE® est un micro béton bitumineux de la famille des BBTM (Béton Bitumineux Très Mince) de classe 2 selon la norme NF EN 13108-2. Il présente un squelette minéral 0/6 discontinu 2/4, avec un fort pourcentage de gravillons 4/6. Cette composition (Tableau 5) conduit à une courbe granulométrique très grenue.

Tableau 5 : Composition du VIAPHONE® du chantier de la RD 911

Constituant	Proportion
Granulat 4/6	75,1 %
Granulat 0/2	17,8 %
Filler	1,9 %
Bitume modifié	5,2 %

VIAPHONE® X1 et X2

Les produits expérimentaux VIAPHONE® X1 et X2 ont fait l'objet d'études en laboratoire supplémentaires. Leur composition a été établie à partir de la composition de référence du VIAPHONE® (Tableau 5) en procédant à des ajustements liés :

- A la courbe granulométrique de l'additif X1 (cf. Tableau 6)
- A l'apport de liant par l'additif X2 (cf. Tableau 7)

Tableau 6 : Composition du VIAPHONE® X1 du chantier de la RD 911

Constituant	Proportion
Granulat 4/6	82,8 %
Granulat 0/2	9,0 %
Filler	3,0 %
Bitume modifié	5,2 %
Additif X1	9 kg/t d'enrobé

Tableau 7 : Composition du VIAPHONE® X2 du chantier de la RD 911

Constituant	Proportion
Granulat 4/6	73,3 %
Granulat 0/2	18,0 %
Filler	3,3 %
Bitume modifié	5,1 %
Additif X2	0,3 %

Mise en œuvre et contrôle des planches d'essai

Les additifs employés pour les VIAPHONE® X1 et X2 ont été conditionnés au Centre de Recherche d'Eurovia en sacs thermo-fusibles. Ils ont ensuite été livrés à la centrale d'enrobage LGE de Marmande (47) pour leur emploi sur un poste d'enrobage discontinu Ermont de type TOPTOWER 3000 (Figure 14).

La densité de l'additif X1 (mousse EPDM) a conduit à le conditionner en sac de 3 kg.

La réalisation des planches expérimentale de VIAPHONE® X1 et X2 a été précédée d'une épreuve de faisabilité destinée à caler les cadences de fabrication et l'étalonnage des pré-doseurs. A noter que pour le produit X1, la fabrication est rendue complexe du fait de la faible densité du produit. Cet additif, dosé à 9 kg par tonne d'enrobé représente un volume de plus de 20 % des matériaux employés dans le VIAPHONE® X1.



Figure 14 : Centrale d'enrobage LGE de Marmande - Additif X1 conditionné en sacs sur palettes (gauche) et incorporation de l'additif par la trappe d'introduction du malaxeur avant l'injection du bitume (droite).

La mise en œuvre du VIAPHONE® et des VIAPHONE® X1 et X2 a eu lieu mi-novembre 2013 (cf. Figure 15).



Figure 15 : Mise en œuvre des procédés VIAPHONE® sur le chantier de la RD 911

Les contrôles de fabrications par prélèvements ont été réalisés par le laboratoire de la Direction technique déléguée Sud-Ouest d'EUROVIA Management.

Ces contrôles ont été complétés par la détermination d'épaisseur de mise en œuvre par carottage et par auscultation au moyen d'imagerie RADAR (Figure 16). Le Tableau 8 présente une synthèse de ces mesures d'épaisseur.

Tableau 8 : Relevé des épaisseurs moyennes des différences planches de VIAPHONE®

Produit	Epaisseur moyenne (carottage)	Epaisseur moyenne (RADAR)
VIAPHONE®	35,0 mm	37,0 mm
VIAPHONE® X1	27,5 mm	26,2 mm
VIAPHONE® X2	31,0 mm	32,5 mm



Figure 16 : Dispositifs de mesure des épaisseurs par imagerie RADAR

L'ensemble de ces contrôles réalisés attestent de la conformité des fabrications des procédés VIAPHONE®.

3.2.2.1.2 Elaboration du programme d'expérimentations in situ

Le programme d'essais à réaliser, dans le cadre du projet ODSurf, par les équipes d'EUROVIA et de l'IFSTTAR, sur la RD 911 à Villeneuve-sur-Lot a été élaboré en partant sur le principe de dupliquer les essais réalisés par l'IFSTTAR au printemps 2013 sur la piste de référence de l'IFSTTAR Nantes.

Dans un premier temps, il a été envisagé de conduire ce programme d'essai sur chacune des trois planches expérimentales réalisées sur le chantier de la RD 911. Toutefois, la prise en compte des contraintes propres à la réalisation des essais in situ (nécessité de fermer la section expérimentale à la circulation pendant la durée des mesures et réalisation de mesure de nuit) combinée à la durée de caractérisation complète d'un point de mesure a conduit à retenir un unique revêtement pour cette caractérisation.

Les paragraphes suivants listent les outils de mesure employés par EUROVIA puis présentent une analyse des planches expérimentales, basée sur une caractérisation préliminaire des produits et une analyse du comportement au jeune âge des produits expérimentaux. Cette analyse débouche sur le choix d'une planche d'essai de référence. Enfin, ils décrivent le programme d'essais réalisé conjointement avec l'IFSTTAR.

Outils de mesure EUROVIA sur site

Dispositif de mesure du bruit en continu

Le dispositif de mesure du bruit développé par le Centre de Recherche d'EUROVIA (Figure 17) en 2006 est destiné à la réalisation d'essais suivant la méthode d'essai des LPC n°63 version 2 [12], la norme XP S 31-145-1 [13] et le projet de norme ISO 11819-2 [9]. Cette méthode consiste à mesurer le bruit émis par le pneumatique d'une roue d'un véhicule d'essai en champ proche ou CPX (moins d'un mètre de la roue).

La réalisation de mesure du bruit en continu mobilise deux techniciens, le premier conduit le véhicule et le second pilote le système d'acquisition à l'aide de l'ordinateur portable.

Véhicule avec limiteur de vitesse



Figure 17 : Vue d'ensemble sur véhicule de mesure du bruit en champ proche EUROVIA

Le dispositif de mesure est porté par un véhicule Renault Scénic II équipé de :

- deux pneumatiques d'essais

Ces pneumatiques d'essais sont des Michelin Energy Saver 195/60 R15 (Figure 18) dédiés aux campagnes de mesure acoustique. Ils sont montés sur le véhicule sur le site de mesure avant la réalisation des essais puis sont mis à température en circulant pendant 30 minutes environ avant les premières mesures.

- Supports de microphones

Les supports de microphone sont fixés sous le châssis du véhicule (Figure 18). Ils permettent le maintien des microphones latéraux et du microphone arrière en position de mesure une fois l'équipage de mesure à bord du véhicule. Les microphones latéraux sont positionnés à 10 cm de la surface de la chaussée, 20 cm du flanc du pneumatique et 20 cm de part et d'autre de l'axe de rotation du pneumatique. Le pneumatique arrière est positionné à 15 cm de la surface de la chaussée et à 80 cm de l'axe de rotation de la roue dans l'axe de la bande de roulement.



Figure 18 : Sculpture du pneumatique de mesure (gauche) et supports des microphones (droite)

- **de microphones**

Les trois microphones équipant le dispositif de mesure sont des microphones de dimension 1/2" dont l'étendue de mesure est comprise entre 6Hz et 20 kHz. Le modèle employé est la référence 4189-A-021 de la marque Bruël et Kjaer. Ils sont équipés de protection anti vent de référence UA 0237. Chaque campagne de mesure est accompagnée d'une vérification de la calibration des microphones à l'aide d'un calibrateur acoustique Bruël et Kjaer 4231.

- **d'un tachymètre**

Le système de tachymétrie réalise la mesure de distance à partir de la rotation de la roue codeuse du système ABS du véhicule.

- **d'un système d'acquisition**

Le système d'acquisition est composé d'un châssis national instrument cDAQ-9184 équipé d'un module d'acquisition rapide 9234 destiné à la mesure synchrone des 3 microphones et du tachymètre à une fréquence de 50 kHz et d'un module d'acquisition lente 9211 destiné au mesure de température de l'air à l'extérieur du véhicule à une fréquence de 1 Hz.

- **d'une suite logicielle de mesure et d'analyse**

La suite logicielle comporte un module destiné à la capture des mesures sur site et d'un module destiné au post traitement des mesures en bureau. Cette suite logicielle est en version 0.9.4. Elle a été développée par le Centre de Recherche d'Eurovia sous LabVIEW 8.6.

- **d'un ordinateur portable**

L'ordinateur portable est un PC durci de marque GETAC fonctionnant sur Windows 7 et connecté au système d'acquisition par un câble Ethernet.

Dispositif de mesure de texture

Le dispositif de mesure de texture utilisé par le Centre de Recherche (CRM), développé en 2014, permet un relevé rapide sur site d'une cartographie fine en trois dimensions des hauteurs d'une surface de revêtement routier. Le principe utilisé est celui de la stéréo-photométrie, permettant de reconstruire une image 3D à partir de trois photos prises sous des angles différents. Le dispositif est piloté par un logiciel d'acquisition et d'analyse de surface (licence CNRS) basé sur le traitement du signal et des images qui permet de mesurer la géométrie et la colorimétrie d'une surface de dimension 6 cm x 8 cm. La cartographie permet ensuite d'évaluer divers indicateurs de surface, tels que l'indicateur normalisé de Profondeur Moyenne de Profil selon la norme ISO 13-473-1 [14].



Figure 19 : Vue d'ensemble du Stéréophotomètre et du système photo

La détermination de la profondeur moyenne de la macrotexture de la surface d'un revêtement est réalisée en mesurant la courbe de profil de cette surface et en calculant la profondeur de texture à partir de ce profil. Cette technique normalisée est conçue pour fournir une valeur de la profondeur moyenne de la macrotexture du revêtement uniquement et est supposée insensible à la microtexture et à l'uni du revêtement. Cette méthode est une alternative à la méthode volumétrique traditionnelle à la tache¹⁰ (qui utilise généralement du sable ou des microbilles de verre) et qui donne des valeurs de texture comparables.

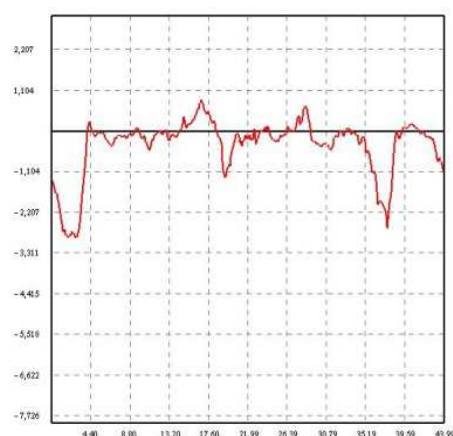
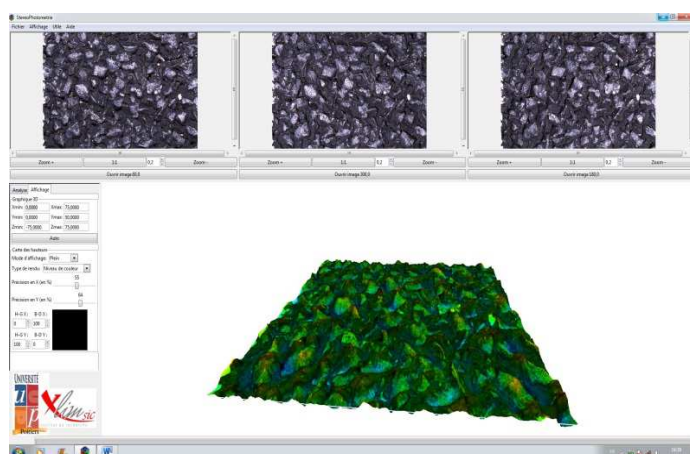


Figure 20 : Capture d'écran du logiciel de traitement des données et d'un profil 2D isolé

¹⁰ Mesure effectuée conformément à la norme NF EN 13 036-1 « Caractéristique de surface des routes et des aérodromes – Méthode d'essai – Partie 1 : Mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache », 12 pages, révisée en septembre 2010. Il s'agit de verser 25 cm³ (V) de billes de verre calibrées sur la chaussée, de les étaler à l'aide d'un disque spécial en une plage circulaire jusqu'à affleurement et de mesurer le diamètre moyen du cercle pour obtenir sa surface S. On calcule la Profondeur Moyenne de Texture (PMT) par la relation $PMT = V/S$ en mm.

Le matériel utilisé par le CRM pour effectuer les mesures est composé des éléments suivants :

- **Un appareil photo**

L'appareil utilisé est un appareil photo numérique reflex Nikon D300S. Le D300S est un reflex professionnel compact de format DX. Sa sensibilité va de 200 à 3200 ISO. Il intègre un capteur CMOS ultra-sensible de 12,3 millions de pixels et prend en charge une vitesse de prise de vue en continu record de 7 vps. Le système AF 51 points plébiscité de Nikon assure une couverture étendue et une sensibilité élevée dans des conditions de faible luminosité.

- **Un objectif de 105 mm**

L'objectif utilisé est un objectif NIKORR AF-S VR 105 mm f/2.8G IF-ED qui intègre le système de réduction de vibration Nikon de deuxième génération (VR II) qui facilite considérablement la prise de vue avec réduction de vibration (VR). Sa résolution élevée et ses excellentes performances optiques sont parfaitement adaptées aux reflex numériques.

- **Trois flashes**

Les flashes utilisés sont des flashes SB-910 i-TTL professionnels, compatibles avec les reflex Nikon aux formats FX et DX et associés au système d'éclairage créatif Nikon. Rapide, polyvalent et performant, le SB-910 offre de nombreuses possibilités de prises de vue, qu'il soit fixé sur l'appareil photo ou utilisé comme flash sans fil. Trois zones d'illumination permettent de maîtriser totalement la couverture du flash avec une couverture angulaire automatique de 17 à 200 mm.

- **Un ordinateur portable**

L'ordinateur utilisé est un Fujitsu CELCIUS Mobile H 720 Quad Core possédant les caractéristiques suivantes : écran de 15,6" / Processeur Core i7 3630 QM / RAM de 8 Go / Disque dur de 500 Go HDD / Système d'exploitation Windows 8.

- **Un logiciel d'acquisition et d'analyse de surface**

Le logiciel d'acquisition et d'analyse de surface est basé sur le traitement du signal et des images. Il est issu de plusieurs années de recherche au sein de laboratoire Xlim-SIC de l'Université de Poitiers. Ce logiciel est fourni via un setup et nécessite une activation de sa licence pour pouvoir fonctionner (licence monoposte).

- **Un boîtier adapté pour être mobile pour le projet ODSurf**

L'algorithme développé par le laboratoire XLIN-SIC de l'Université de Poitiers a été implémenté par le CRM dans un appareil de terrain, transportable sur site routier et facilement déplaçable de manière à multiplier les points de mesure. La mesure rapide (quelques secondes) entièrement automatique est adaptée à une utilisation par des non-spécialistes. Elle permet le contrôle de routine de la texture de chaussée et pourrait, à terme, se substituer à l'essai à la tâche de billes, grâce à une ergonomie supérieure et une bien meilleure reproductibilité.



Figure 21: Dispositif de mesure de texture sur le site de la RD 911 (Villeneuve-sur-Lot)

Enfin la finesse de la cartographie 3D délivrée (résolution horizontale de 35 microns) pourrait permettre, à partir de relevés sur site, le développement de nouveaux indicateurs de texture en lien avec diverses propriétés de surface de chaussée (adhérence, bruit, résistance au roulement).

Analyse des planches expérimentales

Analyse du comportement des produits expérimentaux

Les observations réalisées après l'ouverture au trafic ont montré le bon comportement des couches de VIAPHONE® et VIAPHONE® X2. Ces éléments sont étayés par le bon comportement acoustique de la planche d'essai mesurée lors de la campagne d'essai réalisée en septembre 2014.

La planche d'essai expérimentale X1 a donné lieu à l'apparition de désordres de type départs de gravillons et apparitions de tâches dès la mise en service qui a eu lieu en décembre 2013 (Figure 22). Sur la base de ces constats, l'emploi de mousse d'EPDM comme additif phonique a été jugé non valide. En effet, outre le caractère esthétique, l'apparition des désordres conduit à une dégradation significative des performances acoustiques.



Figure 22 : Désordres observé sur la planche expérimentale X1

L'agence travaux a procédé à la réfection de la planche X1 en mai 2014. La couche d'enrobé existante a été rabotée et remplacée par une couche de VIAPHONE® sur l'ensemble des 277 mètres de la zone incriminée.

Caractérisation acoustique préliminaire

Une caractérisation acoustique préliminaire du chantier expérimental a été réalisée par le Centre de Recherche d'Eurovia en mai 2014 afin de sélectionner la zone expérimentale à soumettre aux programmes d'essais in situ prévu pour le projet ODSurf.

Les essais ont été réalisés dans les deux sens de circulation (3 passages par vitesse et par sens) suivant la méthode d'essai LPC n°63 aux vitesses de référence de 70 et 90 km/h. La température moyenne durant les essais était de 18°C. Les niveaux sonores de proximités sur les planches de VIAPHONE® et de VIAPHONE® X2 sont présentés sur les Figure 23 à 26 à la température de référence de 20°C.

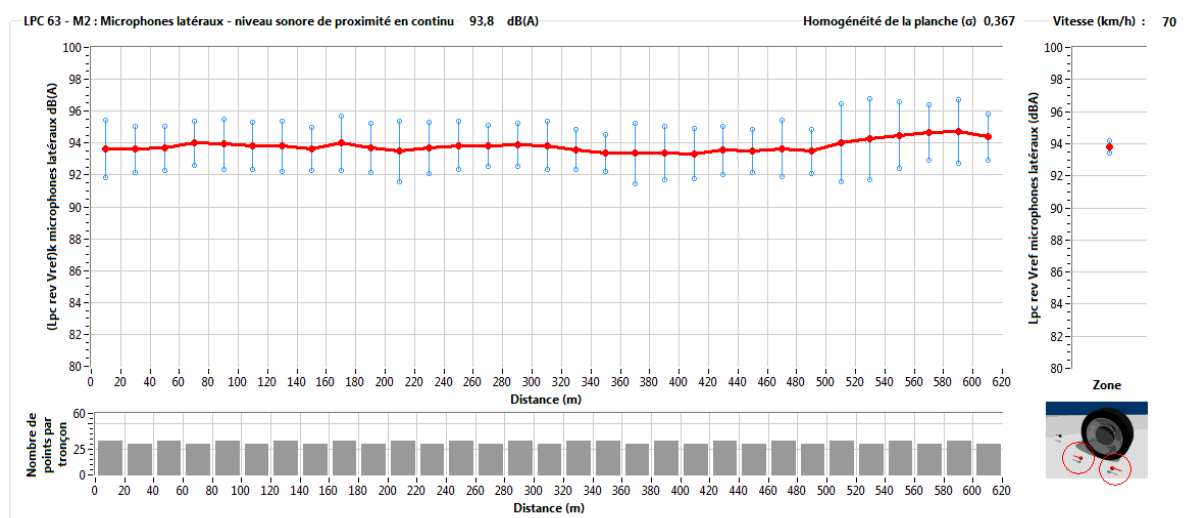


Figure 23 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® à 70 km/h

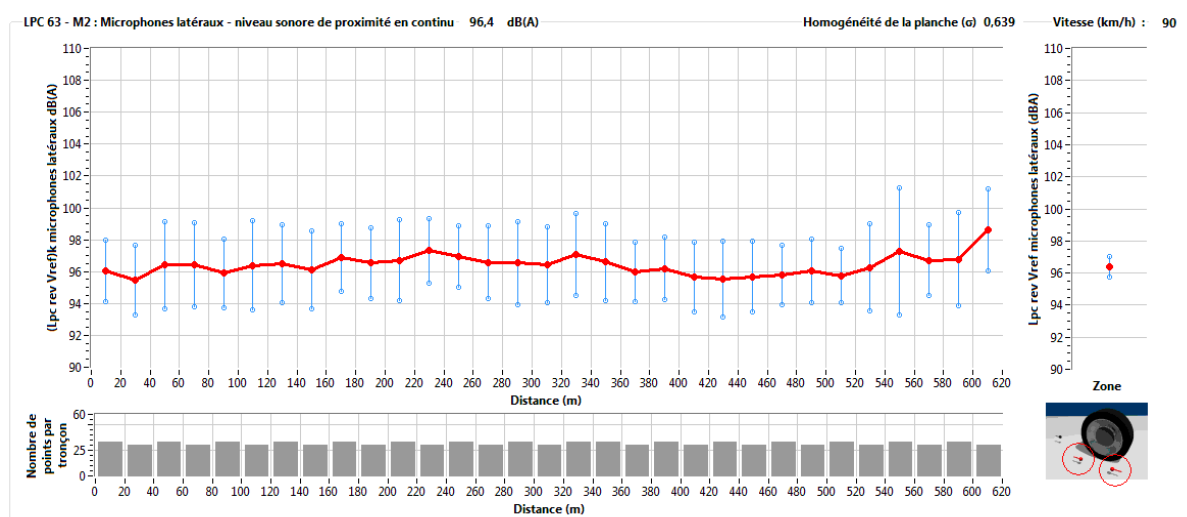


Figure 24 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® à 90 km/h

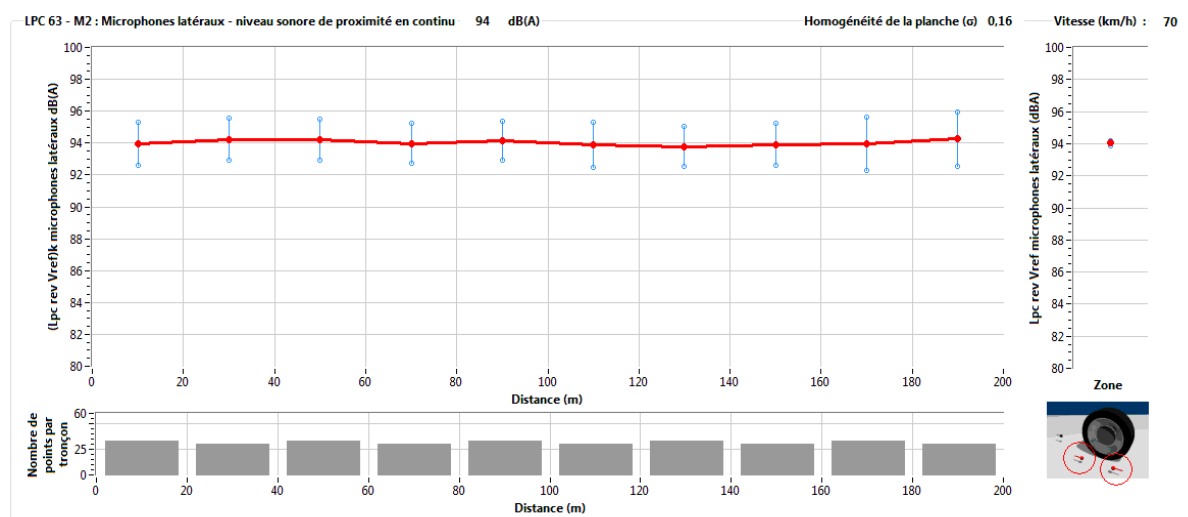


Figure 25 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 70 km/h

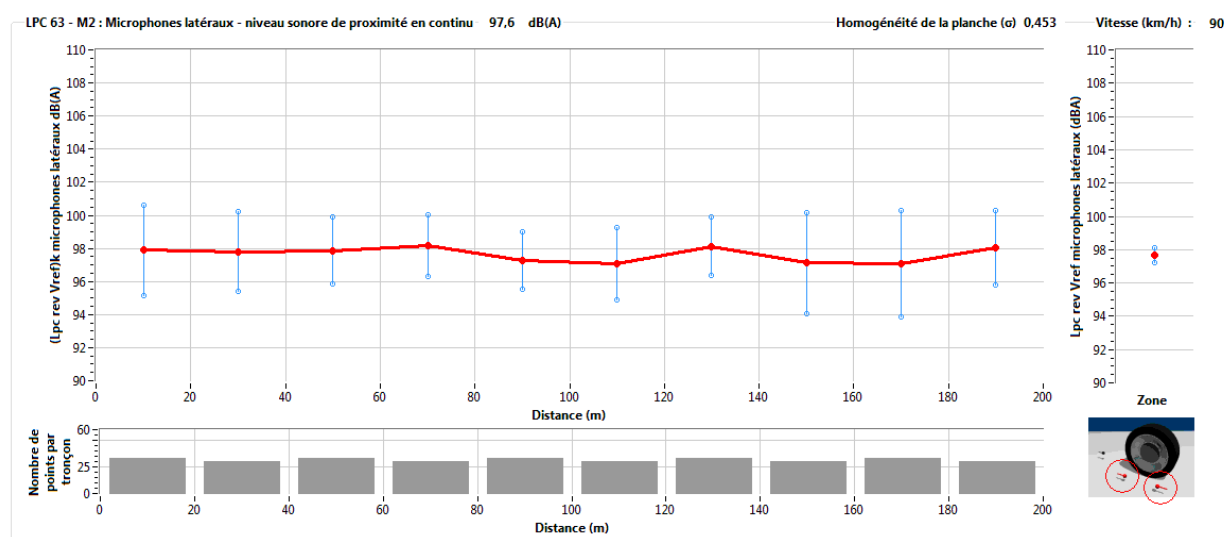


Figure 26 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 90 km/h

L'homogénéité des planches d'essais est inférieure à 1,5 dB et conforme aux préconisations de la note CFTR n°20 [11]. Ces mesures sont conformes aux attentes et attestent de la bonne qualité acoustique des revêtements phoniques mis en œuvre.

Choix d'une planche d'essai de référence

Suite à une reconnaissance sur site réalisée début septembre en présence des services techniques d'EUROVIA et de l'IFSTTAR, le choix de la zone expérimentale s'est portée sur le point métrique 270 de la planche d'essai de VIAPHONE® dans le sens Bordeaux – Villeneuve :

- le point est situé sur une section homogène ($0,64 \text{ dB} < 1,5 \text{ dB}$)
- la zone satisfait aux contraintes de site
- le point est représentatif de la zone sur le plan acoustique

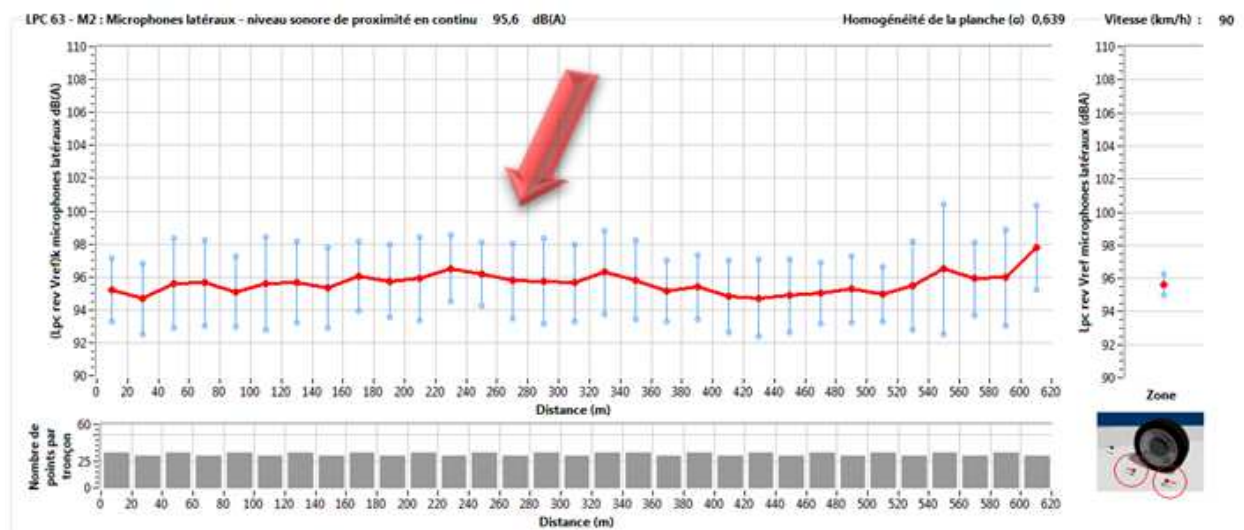


Figure 27 : Position du point de référence pour les essais acoustique et de texture sur le graphe du niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 90 km/h

Programme d'essais

Le programme d'essai de nuit réalisé en septembre 2014 est présenté sur le planning suivant. La réalisation des essais sur les jours 2 et 3 a nécessité une fermeture de la chaussée et un balisage temporaire aux deux extrémités de la voie.

	Jour 1 - déplacements			Jour 2			Jour 3			Jour 4			Jour 5		
	8H-12H	14H-19H	21H-5H	8H-12H	14H-19H	21H-5H	8H-12H	14H-19H	21H-5H	8H-12H	14H-19H	21H-5H	8H-12H	14H-19H	21H-5H
1 Relevé visuel et implantation des zones d'essai (IFSTTAR et EUROVIA)															
2 Mesure de bruit de roulement simultanément au passage et en continu (IFSTTAR)															
3 Mesure du bruit de roulement en champ proche (CPX) suivant la méthode M1 (EUROVIA)															
4 Mesure du bruit au passage (sous-traitant EUROVIA)															
5 Mesure d'absorption acoustique (IFSTTAR)															
6 Mesure de texture 3D (IFSTTAR)															
7 Mesure de texture comparative (EUROVIA)															

Figure 28 : Programme d'essais sur la RD 911

Essais IFSTTAR

Les essais réalisés par l'IFSTTAR sur le site de Villeneuve-sur-Lot sont présentés aux paragraphes 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.4.

Essais EUROVIA

En complément des essais acoustiques réalisés sur la RD 911 et présentés au paragraphe précédent, le Centre de Recherche d'Eurovia a réalisé des mesures de texture avec le dispositif d'essai présenté ci-avant.

Les essais sont réalisés de nuit sur le point de référence de la zone d'essai.



Figure 29 : Essai de texture sur le point de référence de la RD 911
(1- dispositif d'essai EUROVIA, 2- dispositif d'essai IFSTTAR)



Figure 30 : Implantation des profils de mesure sur le point de référence de la RD 911

L'implantation des profils de mesure est repérée vis-à-vis du marquage routier complétée par des tracés au cordeau (Figure 30). Trois profils de mesure sont réalisés. Ils sont implantés comme le décrit la Figure 31.

Chaque profil est constitué d'une série de photos. Le champ d'une photo a une dimension de 6 cm par 8 cm. Le cadrage des photos est réalisé afin de superposer un centimètre avec les photos adjacentes. Ceci permet d'avoir un chevauchement entre les prises de vue.

Les 3 profils de mesure sont décrits dans le tableau ci-dessous. Les chevauchements des photos sont décrits dans la Figure 32. L'orientation des profils est fournie sur la Figure 33.

Tableau 9 : Description des profils de texture

Nom du profil	Nombre de photos	Longueur du profil	Observations
Profil I	7	35 cm	Chevauchement type a)
Profil II	54	378 cm	Chevauchement type b) Réalisé sur la bande de roulement
Profil III	19	95 cm	Chevauchement type a)

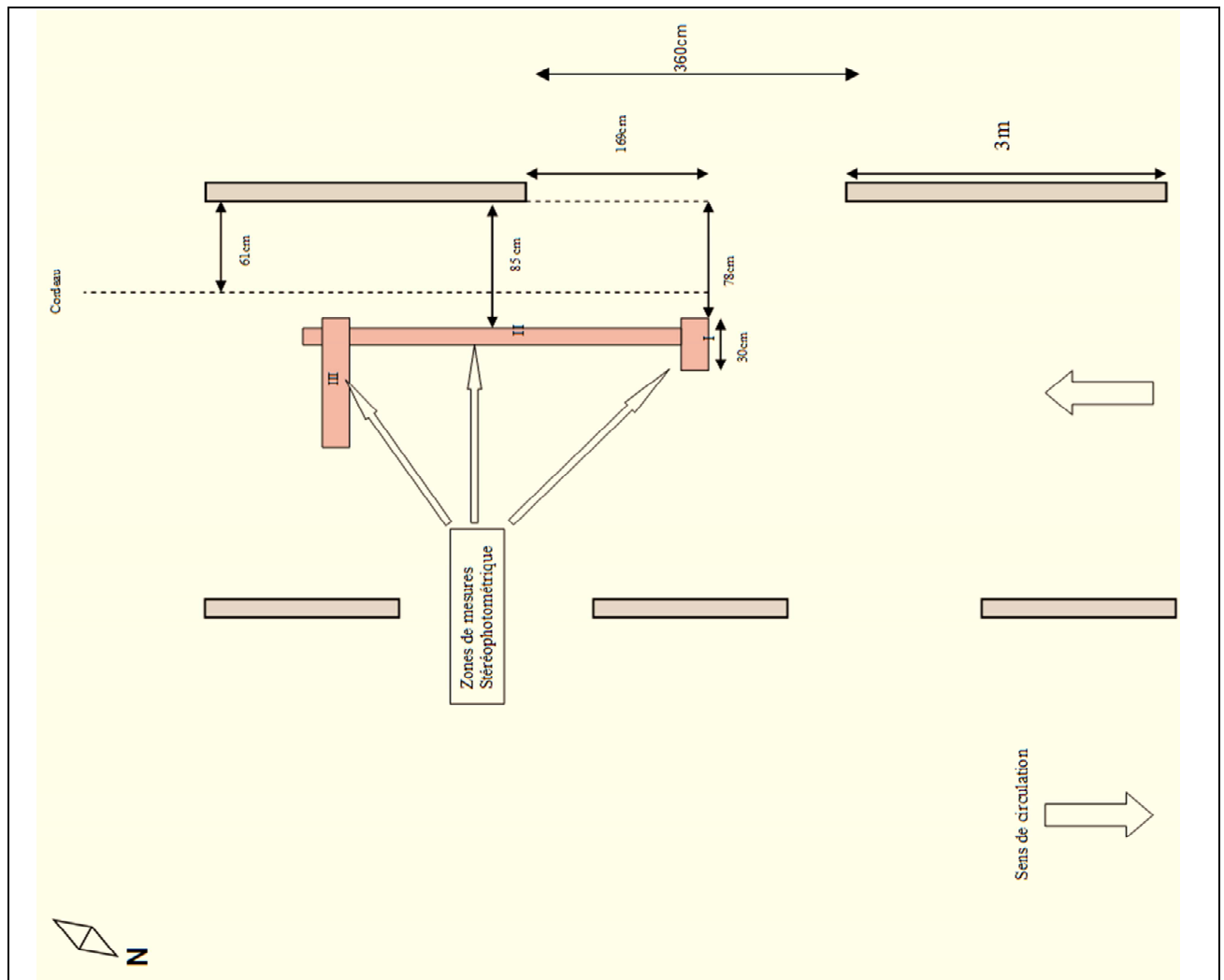


Figure 31 : Implantation des trois profils de mesure de texture sur le RD 911

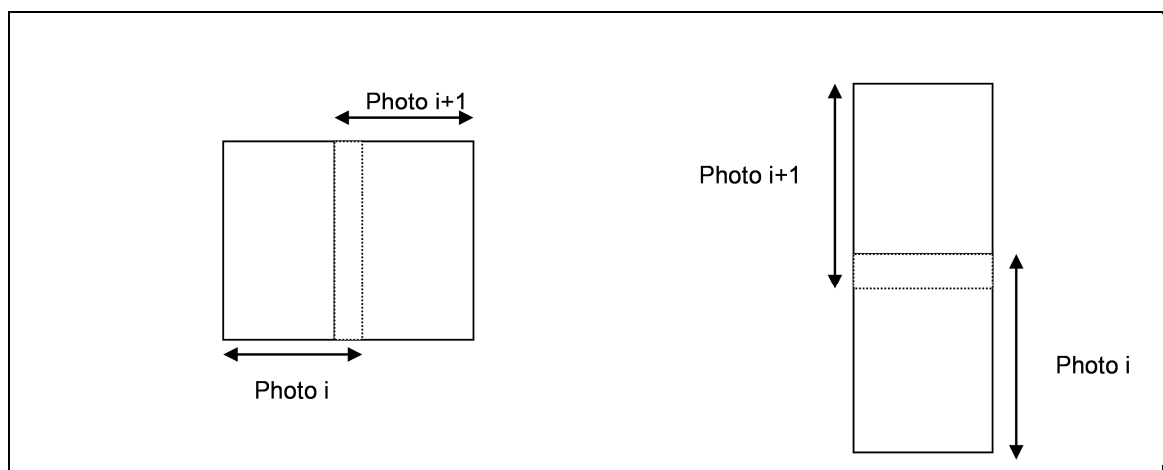


Figure 32 : Chevauchements des photos pour les profils de texture : a) à gauche, b) à droite

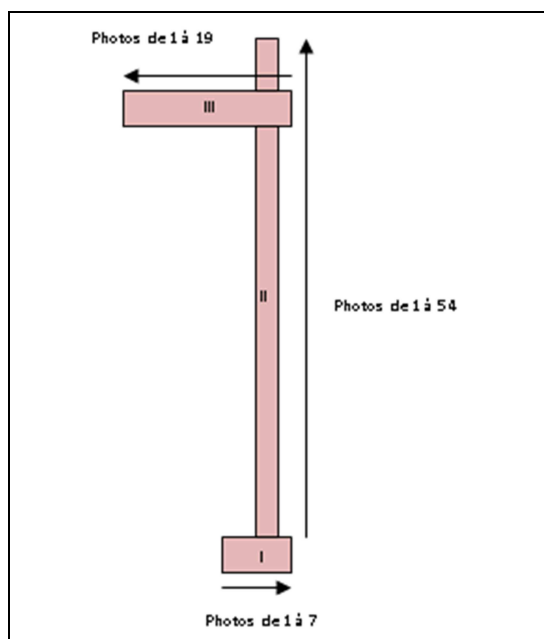


Figure 33 : Orientation des profils de texture

Les PMP (profondeur moyenne de profil) moyenne par photo ainsi que les écarts types des PMP de chaque profil sont représentés sur les figures suivantes.

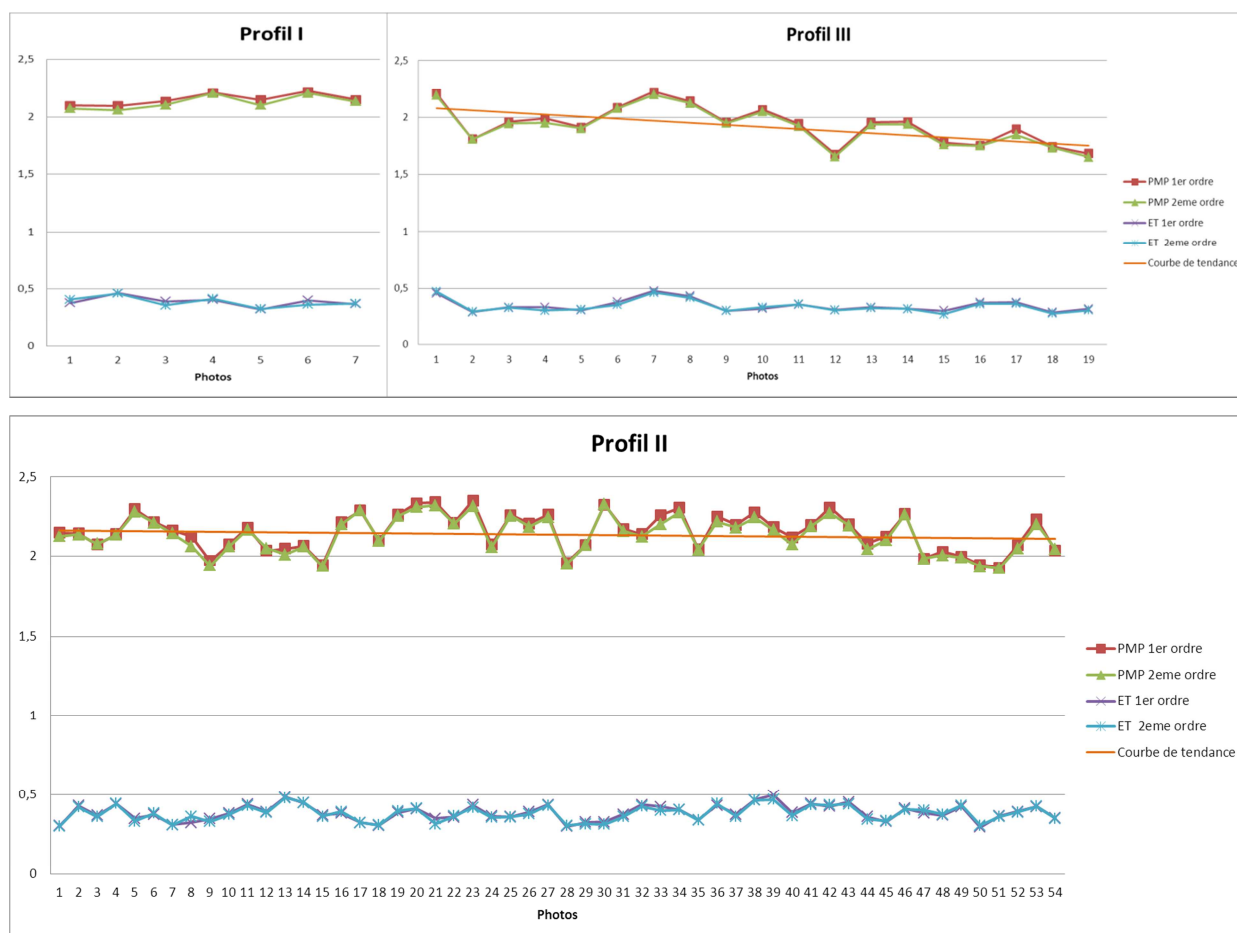


Figure 34 : Courbes de PMP pour les trois profils (I, II et III)

Pour l'ensemble des profils, les PMP au premier et au deuxième ordre concordent.

Les profils I et II présentent des valeurs n'évoluant pas sur le profil, ce qui souligne la régularité de la texture du VIAPHONE®.

Le profil III présente une décroissance des PMP lorsqu'on s'éloigne de la bande de roulement. Cette observation met en évidence que la texture du revêtement testée est plus ouverte au niveau de la bande de roulement. Deux hypothèses peuvent être à l'origine de cette observation : i) le décapage différentiel du film de liant entre la bande de roulement et le reste de la chaussée ou ii) un colmatage de la porosité de la chaussée.

3.2.2.1.3 Bilan du chantier expérimental de Villeneuve sur Lot

La réalisation du chantier expérimental de Villeneuve-sur-Lot a été menée dans le cadre de la tâche 2 du projet ODSurf. Une campagne de mesure de la texture et des propriétés acoustiques a été programmée et réalisée de nuit, grâce à la mobilisation de l'ensemble des acteurs, afin d'alimenter les modèles de prévision du bruit routier, développés dans la tâche 3 du présent projet. Le Conseil Général du Lot-et-Garonne et EUROVIA ont signé une convention de recherche visant à organiser un suivi régulier des performances acoustiques du chantier expérimental.

Dans le cadre de l'expérimentation, deux additifs X1 et X2 ont été expérimentés. L'additif X1, un mousse d'EPDM, entraîne une fragilisation du revêtement phonique accompagnée d'une dégradation rapide de la surface. En conséquence, l'emploi de ce type d'additif est à proscrire.

3.3. Mesures de texture et de bruit sur les planches d'essais (IFSTTAR)

3.3.1. Sites d'essais et revêtements testés

Trois planches d'essais développées dans le cadre de la tâche 2 ont fait l'objet de campagnes de mesure de bruit de roulement et de propriétés de surface de chaussée (texture 3D et absorption) par l'Ifsttar durant l'année 2014. Deux sites d'essais étaient localisés en France et le troisième était localisé en Allemagne (Figure 35). En France, deux surfaces de chaussée conventionnelles peu bruyantes de type Béton Bitumineux Très Mince (BBTM) ont été étudiées. Le premier revêtement était un BBTM 0/4 localisé à Mouvaux près de Lille dans le nord de la France. Le second revêtement était un BBTM 0/6 localisé à Villeneuve-sur-Lot dans le sud-ouest de la France. La troisième surface de chaussée était un Béton ultra-haute performance (UHPC comme « Ultra High Performance Concrete » en anglais) localisé près de la ville de Meinerzhagen au nord-ouest de Cologne en Allemagne.



Figure 35 : Localisation des trois sites d'essais testés par l'Ifsttar au cours du projet ODSurf

3.3.1.1. BBTM 0/4 – Planche d'essais de Mouvaux (France)

La planche d'essai en BBTM 0/4 était localisée sur la route départementale D670, avenue de la Marne à Mouvaux dans le nord de la France (Figure 36). Ce boulevard périurbain est constitué de deux fois deux voies. La vitesse réglementaire du site est de 70km/h. La planche d'essai d'environ 500 mètres de long a été construite en 2009 par la société Colas partenaire du projet ODSurf. Elle avait donc environ 5 ans au moment de la campagne d'essais en juillet 2014. Le BBTM 0/4, commercialisé par Colas sous le nom de Nanosoft®, est un revêtement de chaussée optimisé sur le plan acoustique de par sa taille maximale des granulats de 4 mm et son réseau de vides communicants fins et de forme régulière.



Figure 36 : Localisation du site de Mouvaux (gauche), site d'essai avec indication de la voie et du sens de mesure par une flèche noire (en haut à droite) et aperçu de la surface du BBTM 0/4 dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite)

Les configurations d'essais sur le site de Mouvaux pour le bruit et les propriétés de surfaces sont illustrées Figure 37. Bien que le site soit *a priori* bien adapté pour les mesures, certaines difficultés ont été rencontrées durant les essais. D'une part, en raison du trafic important dans cette zone, les essais ont dû être réalisés de nuit et une seule voie parmi les quatre a pu être fermée à la circulation par le gestionnaire, le reste de la plateforme restant ouvert au trafic. Cette contrainte a mené à des mesures de bruit et des propriétés de surface sur deux voies différentes (cf. schéma) : la mesure du bruit étant dynamique, elle a été effectuée sur la voie rapide ouverte à la circulation et la texture et l'absorption acoustique, qui sont des mesures statiques, ont été réalisées sur la voie fermée à la circulation. D'autre part, bien que travaillant de nuit, le site restait relativement contraignant sur le plan acoustique : présence d'une ligne de tramway en activité, contre-allées circulées de part et d'autre de la plate-forme d'essai et bruyantes bien que limitées à 50 km/h, présence de bordures de trottoir et de platanes autour de la plate-forme. Les mesures de bruit ont également été ralenties par la présence de feux tricolores à respecter entre chaque passage du véhicule d'essai. Enfin, la circulation a pu être coupée une nuit seulement, limitant les mesures de bruit à la monte de pneumatiques standards uniquement (pas d'essai avec les pneumatiques lisses).

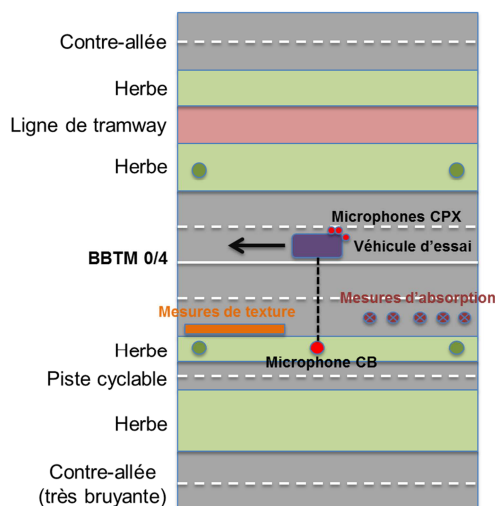


Figure 37 : Configurations d'essais sur le site de Mouvaux

3.3.1.2. BBTM 0/6 – Planche d'essais de Villeneuve-sur-Lot (France)

La planche d'essai en BBTM 0/6 était localisée sur la route départementale D 911 nouvellement construite en 2013 pour contourner la ville de Villeneuve-sur-Lot dans le sud-ouest de la France (Figure 38). Cette route de contournement est constituée de deux voies et est limitée à 90 km/h. La planche d'essai d'environ 800 mètres a été construite en automne 2013 par la société Eurovia partenaire du projet ODSurf. Elle avait donc 1 an au moment de la campagne d'essais en septembre 2014. Le BBTM 0/6, commercialisé par Eurovia sous le nom de Viaphone®, est un revêtement de chaussée spécifiquement conçu et optimisé pour une réduction de bruit durable dans le temps de par sa taille maximale de granulats de 6 mm et son absorption optimisée.

Les configurations d'essais sur le site de Villeneuve-sur-Lot pour le bruit et les propriétés de surfaces sont illustrées Figure 39. Le site d'essai situé en milieu péri-urbain était bien adapté aux mesures envisagées. Le trafic étant important sur cette bretelle de contournement, la circulation a été intégralement arrêtée durant deux nuits consécutives par le gestionnaire, permettant de tester les montes de pneumatiques standards et lisses. Les mesures de bruit, de texture et d'absorption ont ainsi toutes été réalisées sur la même voie et les mesures de texture 3D ont été effectuées dans la trace de roulement des mesures de bruit en continu (méthode CPX). Enfin, l'influence d'un talus et de bas-côtés herbeux sur les mesures de bruit a été limitée en positionnant le microphone de mesure au passage (méthode CB) sur le côté opposé au talus.



Figure 38 : Localisation du site de Villeneuve-sur-Lot (gauche), site d'essai avec indication de la voie et du sens de mesure par une flèche noire (en haut à droite) et aperçu de la surface du BBTM0/6 dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite)

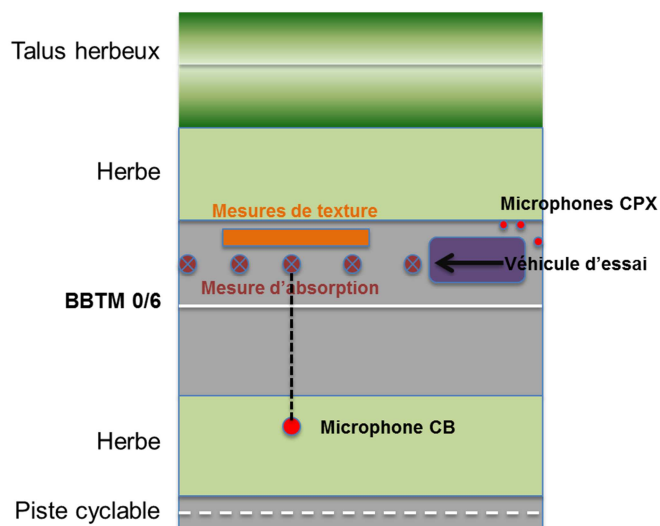


Figure 39 : Configurations d'essais sur le site de Villeneuve-sur-Lot

3.3.1.3. UHPC – Planche d'essais de Meinerzhagen (Allemagne)

La planche d'essai en UHPC était localisée sur une aire de repos de l'autoroute A45, appelée « Rothenstein », et localisée près de Meinerzhagen à l'est de Cologne en Allemagne (Figure 40). La planche d'essai est un démonstrateur développé par certains partenaires allemands (Müller BBM, Université de Kassel, Otto Quast et Strassen NRW) au cours du projet ODSurf. Elle mesure 30 mètres de long et est constituée de six dalles en béton préfabriquées mesurant 3 mètres de large par 5 mètres de long. Une texture optimisée pour la réduction du bruit est moulée en usine sur chacune des dalles en béton. Les dalles sont également soigneusement alignées et scellées sur le site de construction afin de limiter les effets des joints transversaux entre chaque plaque sur le bruit. Le démonstrateur a été construit en octobre 2014 et la campagne d'essais de l'Ifsttar a été réalisée fin novembre 2014.

Les configurations d'essais sur le site de Meinerzhagen pour le bruit et les propriétés de surfaces sont illustrées Figure 41. La principale contrainte était le bruit de fond de l'autoroute A45, constituée de deux fois trois voies de circulations, très fortement circulée par des poids-lourds et sans limitation de vitesse. Le bruit de fond au microphone de mesure au passage était d'environ 70 dBA dans le cas le moins bruyant. Les mesures de bruit de roulement réalisées au passage n'ont donc pas pu être exploitées. Seules les mesures CPX ont pu être utilisées. L'aire de repos n'était pas encore ouverte à la circulation, mais elle était encore en chantier lors de la campagne d'essai, ajoutant des contraintes de sécurité et de bruit supplémentaires liées aux engins de chantiers. Les mesures de texture ont été réalisées dans la trace de roulement des mesures de bruit en continu (méthode CPX). Aucune mesure d'absorption n'a été réalisée sur ce revêtement fermé. Tous les essais ont été réalisés de jour.

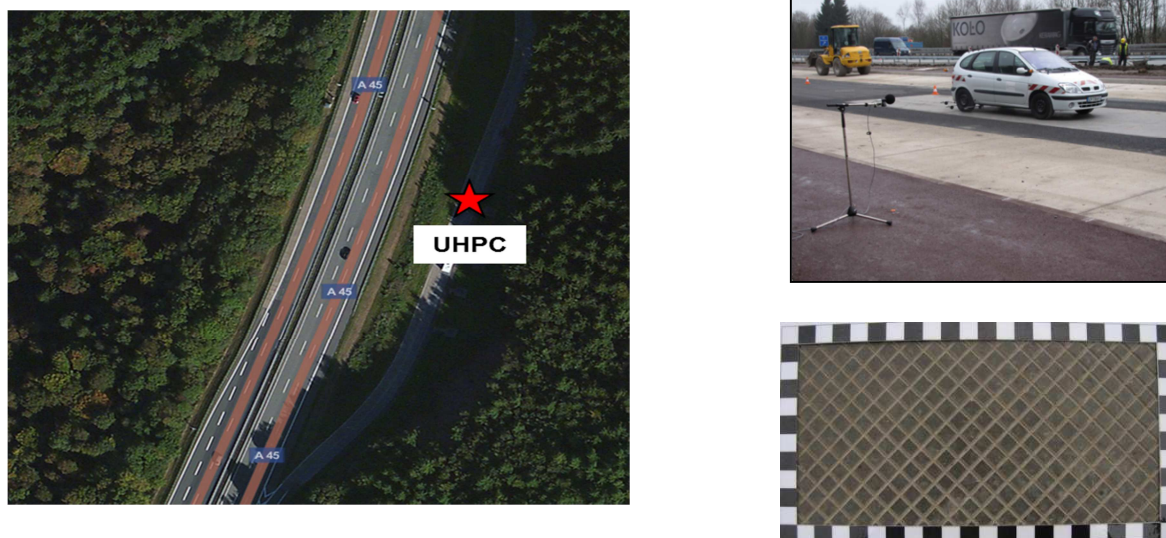


Figure 40 : Localisation du site de Meinerzhagen (gauche), site d'essai (en haut à droite) et aperçu de la surface de l'UHPC dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite)

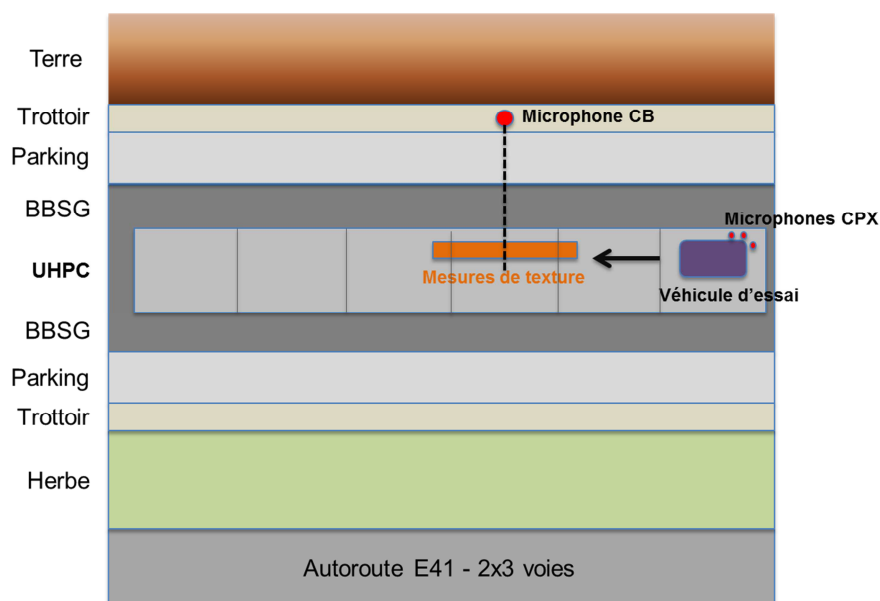


Figure 41 : Configuration d'essai sur le site de Meinerzhagen

3.3.2. Mesures de texture 3D

3.3.2.1. Équipement et méthode de mesure

Un système de mesure de texture des revêtements routiers a été développé dans le cadre du projet. Ce système a pour objectif de pouvoir effectuer en un temps raisonnable des relevés de texture tridimensionnels de longueur et de largeur comparables au périmètre et à la largeur d'un pneumatique d'automobile standard. L'option qui a été retenue pour ce système est d'utiliser un capteur de déplacement sans contact, à laser, capable de fournir simultanément l'altitude de points situés sur un segment de longueur donnée (capteur de profils 2D). Un système de déplacement permet alors d'assurer le balayage par le capteur de la zone à mesurer. Un système d'acquisition recueille les données provenant du capteur.

Trois capteurs différents répondant aux caractéristiques techniques définies préalablement ont été testés. Ces tests ont été réalisés sur différents type de surface en laboratoire et sur piste d'essais afin d'évaluer l'adaptation des capteurs à la mesure sur surface routière ainsi que sur la surface de pneumatiques. La sensibilité à l'ensoleillement a également été testée. Le système de déplacement a été développé en assurant l'interfaçage avec le capteur choisi.

Le système de déplacement permet de déplacer automatiquement le capteur laser horizontalement sur un tronçon rectiligne (axe longitudinal), à vitesse constante, à une distance de travail moyenne de 200 mm et délivre un signal de déclenchement d'acquisition d'échantillons au capteur laser à pas spatial constant. Le système permet de positionner manuellement le capteur latéralement, à l'aide d'une table de positionnement disposée transversalement, de manière à pouvoir effectuer successivement plusieurs relevés parallèles décalés latéralement (voir Figure 42) avec une zone de recouvrement.

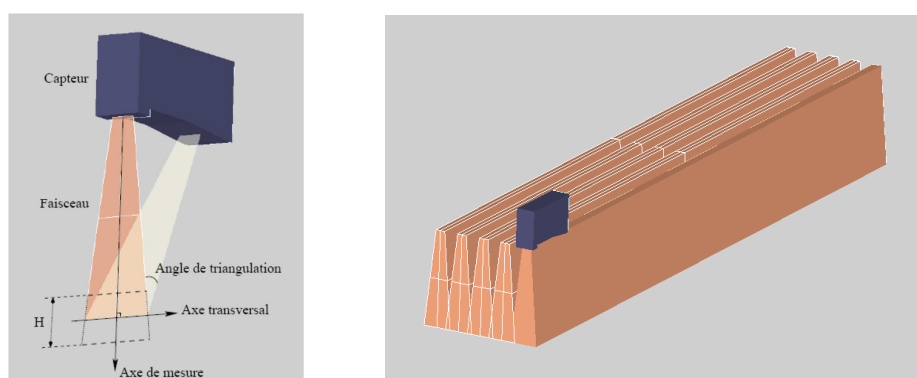


Figure 42 : Schéma-type du capteur laser et principe de balayages successifs de la surface à mesurer pour 5 positions latérales différentes

Le système a été conçu de manière à pouvoir effectuer des mesures in situ. Son encombrement permet de le transporter dans un véhicule de type fourgon (longueur : 2m30, largeur : 0m70, hauteur : 0m60). Son poids de 55 kg permet une manutention sur site par deux opérateurs. Il peut de plus, être alimenté par groupe électrogène. Il dispose de pieds réglables en hauteur qui permettent si besoin d'ajuster la distance de travail capteur/sol. Son champ de mesure vertical de 50mm est suffisant pour pouvoir effectuer des mesures sur des revêtements à fortes méga- et macrotextures. La Figure 43 donne un aperçu du système dans son ensemble. Le système est constitué :

- d'un châssis, constitué d'une poutre maîtresse et de trois pieds, auquel est fixé un axe linéaire motorisé par un moteur «brushless»,
- d'une table de positionnement manuel de course totale 300 mm, fixée perpendiculairement au chariot de l'axe, qui permet de positionner le capteur latéralement,
- d'une armoire de commande déportée qui permet, d'une part, d'effectuer une prise d'origine des déplacements longitudinaux, d'autre part, de lancer les cycles de déplacement pour les positions latérales choisies.

L'acquisition des profils est réalisée à l'aide d'un logiciel fourni avec le capteur. Une fois le cycle de mesure lancé, le contrôleur du moteur délivre des impulsions à pas spatial constant qui sont utilisées pour déclencher la lecture des profils. Le capteur est capable de délivrer jusqu'à 100 profils par seconde. La vitesse d'avancement du capteur est fixée à 10 mm/s, ce qui conduit à un pas d'échantillonnage spatial de 0.1 mm.

Si le pas d'échantillonnage longitudinal est fixe, il n'en est pas de même pour le pas d'échantillonnage transversal. Le capteur délivre en effet des nuages de points, tel que celui représenté Figure 44 sous la forme d'un ensemble de points dont les coordonnées sont données dans le plan du faisceau laser. Le champ de vision étant trapézoïdal, la distance horizontale entre points successifs dépend de leurs positions verticales.

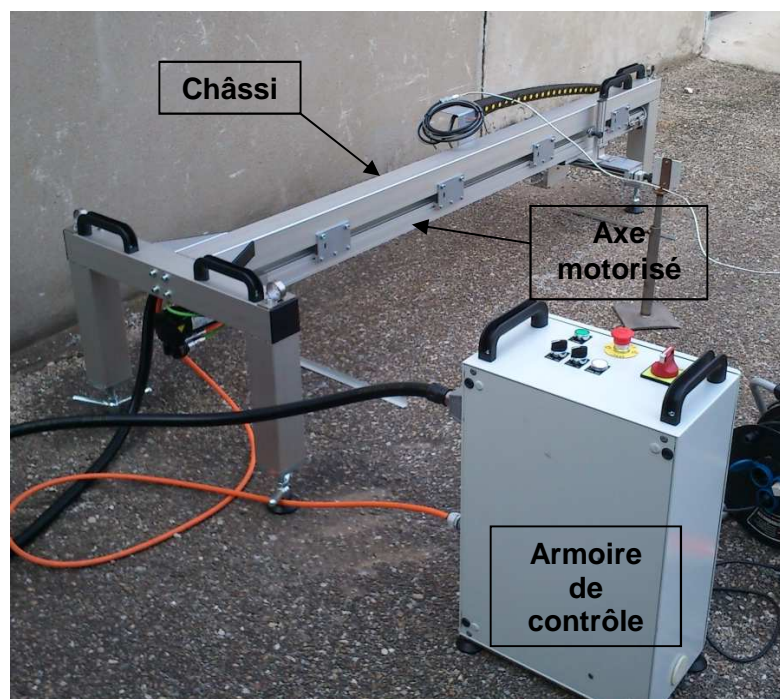


Figure 43 : Différentes vues du système – En haut : vue d'ensemble – En bas à gauche : table de positionnement transversal et mollette de positionnement latéral du capteur – En bas à droite : capteur laser

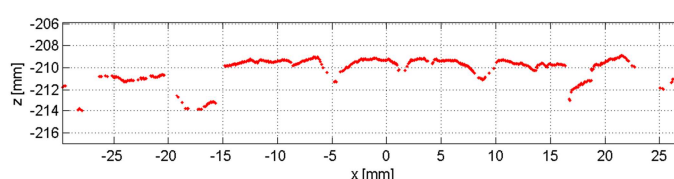


Figure 44 : Exemple de profil délivré par le capteur (nuage de points)

Différents algorithmes ont été développés pour permettre la reconstruction d'un relevé complet à partir des bandes longitudinales. Ces algorithmes consistent en particulier à assurer le raccordement des bandes adjacentes en s'aidant de repères placés en début et fin de relevés (réglettes) qui servent à effectuer une correction d'un léger défaut d'alignement du capteur par rapport à l'axe de la coulisse transversale, à combler les zones manquantes dues à la triangulation opérée par la capteur ou à traiter les invalidités provoquées par des réflexions spéculaires de la surface, enfin à ré-échantillonner les relevés de manière à obtenir des données à pas spatial constant directement utilisable dans les modèles.

Les caractéristiques des relevés reconstruits pour une position de stationnement (appelé dans la suite relevé unitaire) de l'appareil sont données ci-après :

- Longueur maximale : 1500 mm
- largeur maximale: 350 mm
- pas d'échantillonnage (longitudinal et transversal) : 0,1 mm
- répétabilité verticale point à point : 30 μm

La méthode adoptée dans le cadre du projet a consisté à effectuer plusieurs relevés unitaires successifs dans la bande de roulement de mesure de bruit CPX en assurant une zone de recouvrement longitudinal d'environ 10 cm de longueur entre relevés unitaires de manière à pouvoir reconstruire un relevé complet plus long que ce qu'autorise l'appareil pour une seule position de stationnement. Pour assurer l'alignement des relevés unitaires successifs, un cordeau tendu entre deux blocs d'acier est utilisé pour positionner l'appareil.

Un algorithme spécifique semi-automatique a été développé pour permettre le raccordement longitudinal des relevés sur la base des 10 cm de recouvrement. La phase manuelle de cet algorithme consiste à sélectionner sur chaque relevé dans la zone de recouvrement quelques points remarquables (en pratique des aspérités facilement identifiables), à ajuster par corrélation croisée les coordonnées des aspérités choisies dans le repère des relevés unitaires concernés, et à déterminer les transformations géométriques (translations, rotations) permettant d'exprimer les coordonnées des points d'un relevé dans le système de coordonnées du relevé adjacent précédent. Un exemple de marquage d'aspérités remarquables est donné Figure 45 : les symboles « + » affectés d'un numéro représentent les aspérités sélectionnées visuellement sur la fin du premier relevé (figure du bas) et le début du deuxième relevé (figure du haut).

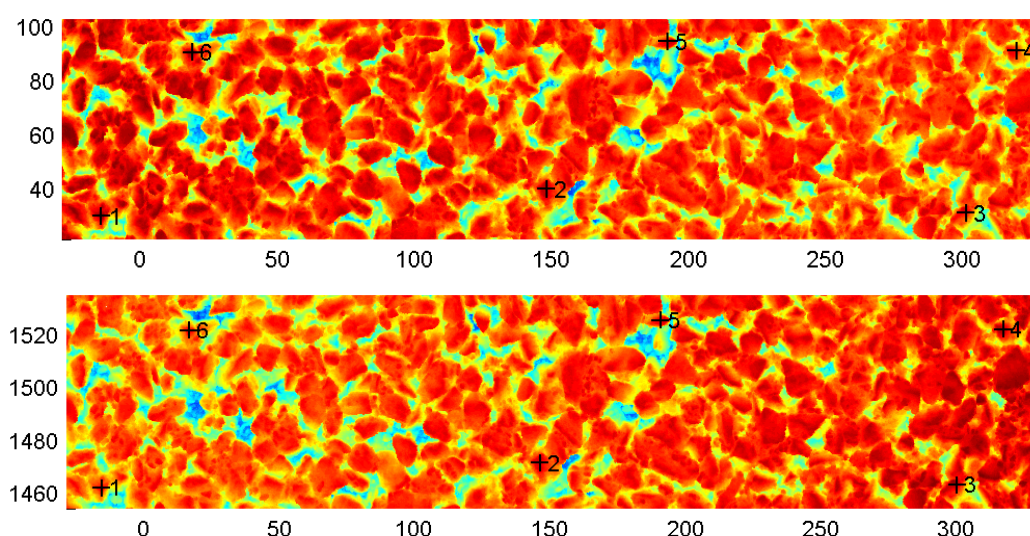


Figure 45 : Sélection de six aspérités pour le recalage de deux relevés unitaires adjacents

Cette méthode a été utilisée pour tous les relevés de texture réalisés dans le cadre du projet, en procédant à la mesure de texture de 2 à 4 relevés unitaires permettant la reconstruction de surfaces de l'ordre de 3 à 6 m de longueur sur 30 à 35 cm de largeur. Si les relevés unitaires de 1,50m de longueur sont suffisants pour évaluer des paramètres de texture standards, en particulier les spectres de texture, les relevés reconstruits à partir de plusieurs relevés unitaires peuvent être utilisés directement dans des modèles de contact dynamique offrant la possibilité de « rouler » sur une distance supérieure au périmètre d'un pneumatique de véhicule léger (environ 2m).

3.3.2.2. Méthode d'analyse des données

Plusieurs quantités permettent de caractériser les textures mesurées. Ces quantités sont définies dans la série de normes ISO 13473 dédiée à la caractérisation de la texture des revêtements de chaussée à partir de relevés de profil.

Profondeur moyenne de profil (PMP) et profondeur de texture équivalente (PTE) :

Ces quantités sont évaluées à partir de profils mesurés selon la norme ISO 13473-1. Elles ont été évaluées à partir de relevés longitudinaux extraits des relevés 3D à raison d'un profil extrait par pas latéral de 4cm, soient 7 à 8 profils longitudinaux extraits par planche.

La Figure 46 définit les termes utilisés pour le calcul de la PMP. Les profils extraits sont préalablement filtrés à l'aide d'un filtre numérique passe-bas conservant les composantes du signal de longueurs d'onde comprises entre 5 mm et 50 mm en atténuant (d'au moins 3 dB) les composantes de longueurs d'onde inférieures à 2,5 mm. Les valeurs individuelles de la PMP sont évaluées sur une ligne de base de longueur

égale à 100 mm sur le profil redressé, après suppression de pente et de décalage vertical par régression linéaire. La PMP est alors calculée comme étant la différence entre la moyenne arithmétique des niveaux de pic les plus élevés sur chaque moitié de la ligne de base, et le niveau moyen sur la ligne de base entière.

La profondeur moyenne de texture (PMT) est obtenue par la méthode (standardisée) volumétrique à la tache et représente le rapport entre le volume de matériau standardisé remplissant les cavités du revêtement et l'aire de ce matériau répandu en une zone circulaire. Elle n'a pas été mesurée dans le cadre du projet. La possibilité d'évaluer cette quantité à partir des relevés de texture 3D n'a pas été testée. La profondeur de texture estimée PTE est une approximation de la PMP et peut être évaluée à partir de la PMP par la formule statistique $PTE = 0,2 + 0,8 \cdot PMP$.

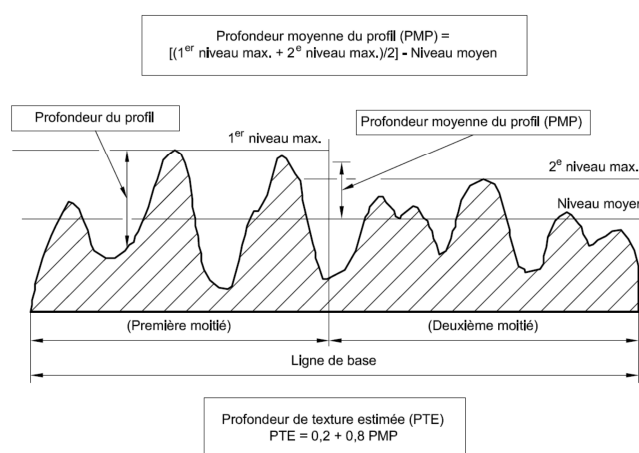


Figure 46 : Définition des termes pour le calcul de la profondeur moyenne de profil PMP

Distribution des altitudes :

La caractérisation de la distribution des altitudes des textures est également définie dans la norme ISO 13473 [14]. Les quantités qui y sont relatives sont évaluées comme pour la PMP à partir de profils mesurés. L'évaluation de ces quantités a toutefois été réalisée en utilisant directement l'information tridimensionnelle fournie par les relevés de texture 3D. Pour ce faire, les relevés 3D bruts sont redressés par éléments de surface de 200 mm x 200 mm par suppression du plan moyen obtenus par régression bilinéaire selon les directions longitudinale et transversale afin d'éliminer les composantes de grandes longueurs d'onde. Les quantités évaluées à partir des relevés redressés sont d'une part, la densité de probabilité des altitudes, d'autre part les indices permettant de la caractériser, l'écart moyen quadratique de la surface Rq , son asymétrie Rsk et son aplatissement Rku , tous trois définis par les expressions suivantes, la valeur moyenne des altitudes des relevés redressés étant égale à 0 (dans ces expressions, $LxLy$ désigne la surface totale du relevé utilisé pour l'évaluation, Z l'altitude des points) :

$$Rq = \left(\frac{1}{LxLy} \iint Z^2(x, y) dx dy \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \frac{1}{LxLy} \iint Z^3(x, y) dx dy, \quad (2)$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \frac{1}{LxLy} \iint Z^4(x, y) dx dy. \quad (3)$$

Un coefficient d'asymétrie positif correspond à une distribution décalée vers le bas par rapport à la médiane et traduit la présence de pics vers le haut. On parle alors de texture positive. Un coefficient d'asymétrie

négligé traduit une surface relativement plane et des pics vers le bas (texture négative), caractéristique des revêtements ouverts ou présentant une certaine porosité. Pour une valeur d'asymétrie proche de 0, on parle de texture neutre (loi gaussienne par exemple).

Concernant le coefficient d'aplatissement, s'il est supérieur à 3, il traduit une distribution étroite; s'il est inférieur à 3, il traduit une distribution étalée, la valeur de 3 étant celle obtenue par exemple pour une distribution gaussienne.

Spectres de texture :

Les spectres de texture permettent de donner l'énergie du signal de texture en fonction de la longueur d'onde de texture λ (ou de la fréquence spatiale considérée) et sont évalués conformément à la norme ISO 13473. Comme pour la PMP, ils sont évalués à partir de profils longitudinaux extraits de relevés 3D. Les profils extraits sont les mêmes que ceux utilisés pour le calcul de la PMP. Chaque profil longitudinal est décomposé en sous-profils de longueur égale à 1,50m avec un recouvrement de 50%. Chaque sous-profil fait l'objet d'une analyse consistant en, successivement, la suppression de la pente et de la valeur moyenne par régression linéaire, l'application d'une fenêtre de Hanning, l'évaluation du spectre correspondant en bandes fines et enfin la recombinaison des spectres en bandes de tiers d'octave à partir des spectres en bandes fines. Les spectres sont donnés en termes de niveaux de texture rapportés à l'amplitude de référence de 1 micron. Le spectre moyen caractérisant la surface mesurée est obtenu en calculant pour chaque longueur d'onde centrale des tiers d'octave considérés la moyenne arithmétique des niveaux obtenus sur l'ensemble des sous-profils issus des profils longitudinaux extraits. Les fréquences centrales et longueurs d'onde de texture correspondantes sont données dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Longueur d'onde et fréquences spatiales centrales des tiers d'octave pour l'évaluation des spectres de texture (les longueurs d'onde et fréquences centrales des bandes d'octave sont données en **gras**)

Longueur d'onde [mm]	Fréquence spatiale [1/m]	Longueur d'onde [mm]	Fréquence spatiale [1/m]	Longueur d'onde [mm]	Fréquence spatiale [1/m]
315	3,15	40	25	5	200
250	4	31,5	31,5	4	250
200	5	25	40	3,15	315
160	6,3	20	50	2,5	400
125	8	16	63	2	500
100	10	12,5	80	1,6	630
80	12,5	10	100	1,25	800
63	16	8	125	1	1000
50	20	6,3	160	0,8	1250

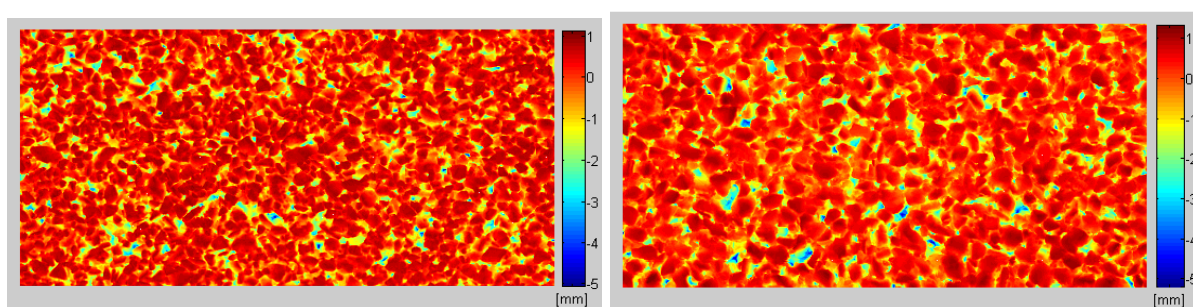
3.3.2.3. Résultats et comparaisons

Pour chaque planche d'essai, 4 relevés unitaires ont été réalisés avec une zone de recouvrement d'une dizaine de centimètres permettant la reconstruction d'une surface de longueur totale proche de 6 m. Les dimensions exactes des surfaces reconstruites sont données dans le Tableau 11. Concernant la planche UHPC, les quatre relevés ont permis de reconstruire la surface sur une longueur légèrement plus importante que celle des dalles en béton qui la constituent (5m) permettant d'apprécier la qualité des transitions entre dalles.

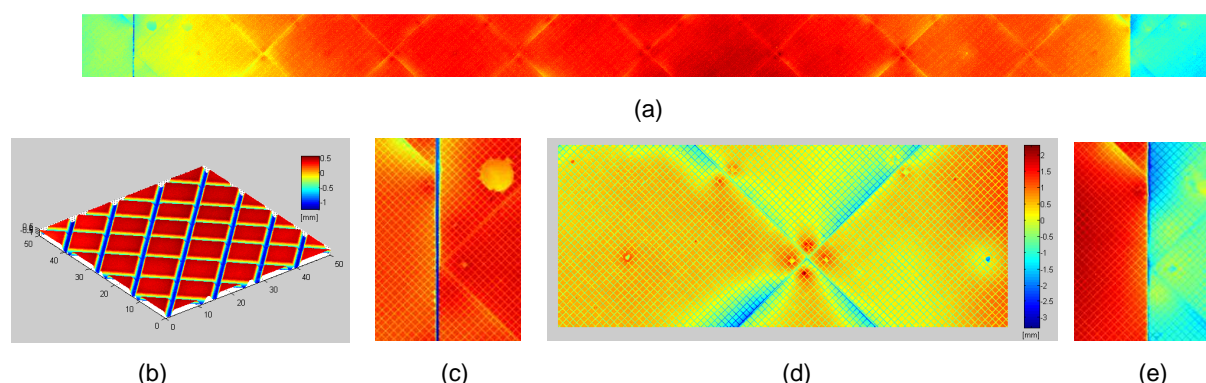
Tableau 11 : Nombre de relevés unitaires mesurés pour chaque planche et taille du relevé reconstruit

Surface	Nombre de relevés unitaires	Largeur [m]	Longueur [m]
BBTM 0/4	4	0,34	5,78
BBTM 0/6	4	0,34	5,78
UHPC	4	0,32	5,67

La Figure 47 donne un aperçu des textures mesurées sur les deux planches conventionnelles BBTM 0/4 et BBTM 0/6. On peut apprécier la texture légèrement plus grossière du BBTM 0/6 par rapport à celle du BBTM 0/4. Les relevés effectués présentent une texture homogène.

**Figure 47** : Extraits des relevés mesurés sur les BBTM 0/4 (à gauche) et BBTM 0/6 (à droite) – Extraits de 10cmx 20cm

La Figure 48 donne un aperçu de la texture mesurée sur la planche UHPC. Les dalles préfabriquées sont constituées d'éléments d'environ 50 cm de côté disposés en oblique par rapport à la direction de roulement. La qualité du rainurage de ces éléments est assez bonne (détail b). Par contre, la juxtaposition de ces éléments pour la constitution de la dalle complète montre certaines imperfections (détail d). De plus, l'assemblage des dalles sur site présente également des imperfections : présence d'une rainure transversale de 5mm de largeur entre la dalle mesurée et la précédente (détail c), présence d'une marche de 5 mm de hauteur entre la dalle mesurée et la suivante (détail e). Ces imperfections sont susceptibles de dégrader les performances du démonstrateur par rapport à une réalisation idéale du concept de ce type de surface.

**Figure 48** : Relevé complet (a) mesuré sur la planche UHPC et détails permettant d'apprécier les imperfections de la réalisation sur site – (b) : détail du réseau de rainures (5cmx5cm), (c) : rainure de 5mm entre la dalle mesurée et la précédente, (d) : détail des imperfections entre jonctions des éléments constitutifs de la dalle (30cmx80cm), (e) : marche de 5mm de hauteur à la jonction entre la dalle mesurée et la suivante

Profondeur moyenne de profil (PMP)

Les PMP ont été évaluées pour les trois planches d'essai tel que décrit dans le paragraphe 3.3.2.2. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 12 et représentés sur la Figure 49, en comparaison de celles

obtenues sur le BBTM 0/6 (planche M2) et le BBSG 0/10 (planche E2) de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais. Concernant les deux BBTM testés, les valeurs obtenues, 0,84 mm pour le BBTM 0/4 et 0,90 mm pour le BBTM 0/6, sont inférieures à celle obtenue sur la planche M2 évaluée à 1,29 mm. La valeur de PMP obtenue sur la planche UHPC, conditionnée par le réseau de rainures de profondeur relativement faible, est inférieure à celles observées sur les BBTM et s'élève à 0,55 mm.

Tableau 12 : Profondeurs moyennes de profils (PMP) évaluées sur les trois planches testées

Surface	PMP [mm]	Ecart-type [mm]
BBTM 0/4	0,84	0,13
BBTM 0/6	0,90	0,16
UHPC	0,55	0,22

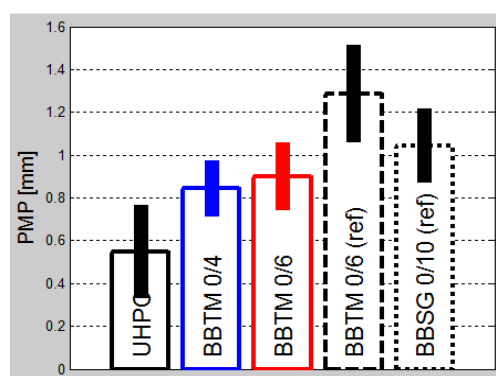


Figure 49 : Valeurs de PMP obtenues sur les trois planches d'essai ainsi que celles obtenues sur les planches E2 et M2

Distribution des altitudes

Les densités de probabilités obtenues sur les relevés des trois planches d'essai sont représentées sur la Figure 50. Celles calculées sur les planches M2 et E2 sont également tracées à titre de comparaison. Ces courbes sont complétées par les valeurs des moments statistiques R_q , R_{sk} et R_{ku} données dans le Tableau 13. On peut constater que les textures des deux BBTM sont clairement négatives, légèrement plus marquées que le BBTM 0/6 de référence ($R_{sk} = -1,20$). Leurs distributions sont également plus étroites que celle du BBTM de référence. Concernant la planche UHPC, la distribution des altitudes est très particulière et présente deux pics correspondant pour le premier à la partie plane supérieure des motifs moulés et pour le second au fond des rainures.

Tableau 13 : Valeurs des moments statistiques R_q , R_{sk} et R_{ku} évaluées sur les trois planches testées

Surface	R_q [mm]	R_{sk}	R_{ku}
BBTM 0/4	0,76	-1,50	5,61
BBTM 0/6	0,83	-1,68	6,55
UHPC	0,65	-1,64	11,34

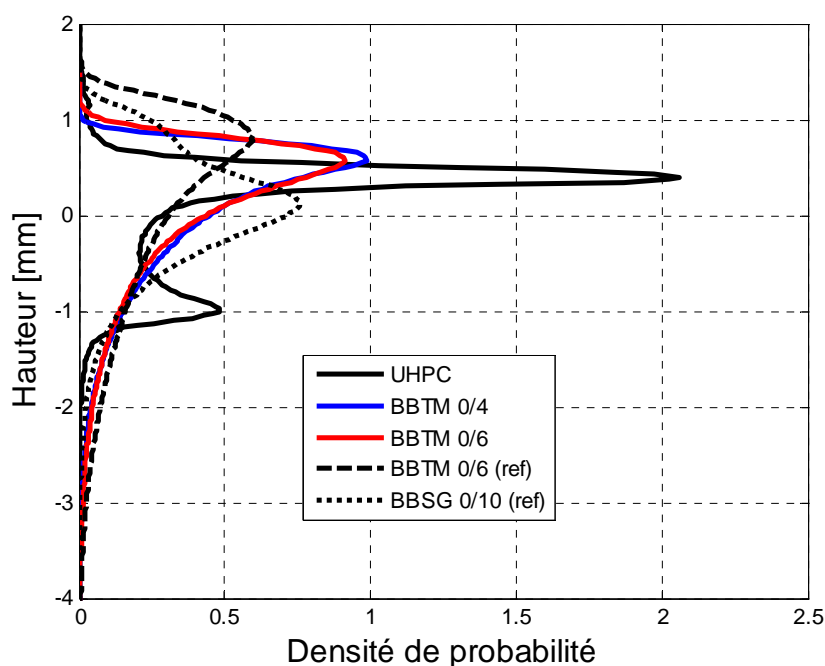


Figure 50 : Densités de probabilités évaluées sur les BBTM 0/4, BBTM 0/6 et UHPC ainsi que celles évaluées sur les planches E2 et M2

Spectres de texture

Les spectres de texture par bandes de tiers d'octave ont été évalués sur les trois planches d'essai selon la méthode décrite au paragraphe 3.3.2.2. Ces spectres sont représentés sur la Figure 51 sur laquelle ont été rajoutés les spectres évalués sur les planches M2 et E2. Pour les longueurs d'onde supérieures à 16 mm, les BBTM 0/4 et 0/6 testés présentent des niveaux comparables à ceux du BBSG 0/10, ceux du BBTM 0/4 étant légèrement inférieurs à ceux du BBTM 0/6. Dans cette gamme de longueurs d'onde, les spectres du BBTM 0/6 de la piste de l'Ifsttar sont plus élevés d'environ 5 dB. Aux longueurs d'onde inférieures à 8 mm, les courbes des deux BBTM testés et de celle du BBTM de référence (planche M2) se superposent. Les niveaux du BBSG 0/10 sont, dans cette gamme de longueur d'onde, inférieurs d'environ 5 dB à ceux des BBTM.

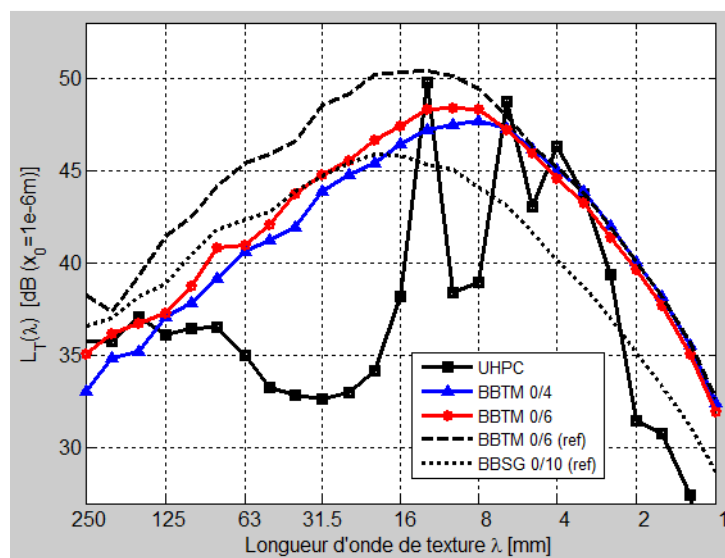


Figure 51 : Spectres de texture par bande de tiers d'octave évalués sur les BBTM 0/4, BBTM 0/6 et UHPC ainsi que ceux évalués sur les planches E2 et M2

Le spectre de l'UHPC est quant à lui très particulier. Pour les longueurs d'onde supérieures à 16 mm, ses niveaux sont très inférieurs à ceux obtenus sur les revêtements conventionnels. Plusieurs pics marqués

apparaissent aux longueurs d'onde inférieures (12,5 mm, 6,3 mm et 4 mm) et correspondent aux motifs créés par les rainures de surface.

3.3.3. Mesures d'absorption acoustique

3.3.3.1. Équipement et méthode de mesure

Les mesures d'absorption acoustique ont été réalisées à l'aide d'un équipement respectant les recommandations de la norme ISO 13472-1 [15]. Le système de mesure est représenté Figure 52. Une source acoustique qui reçoit le signal produit par un générateur est positionnée au-dessus de la surface de chaussée à tester à une distance $d_s = 1,25$ m. Un microphone est placé entre la source et le revêtement, à une distance $d_m = 0,25$ m de la surface à tester. La méthode de mesure est basée sur la détermination de la fonction de transfert entre le générateur de signaux et le microphone. Cette fonction de transfert se compose de deux facteurs, l'un venant du trajet direct entre le générateur de signaux et le microphone (en passant par l'amplificateur et le haut-parleur) et l'autre venant du trajet réfléchi entre le générateur de signaux et le microphone (en passant par l'amplificateur, le haut-parleur et le revêtement soumis à l'essai).

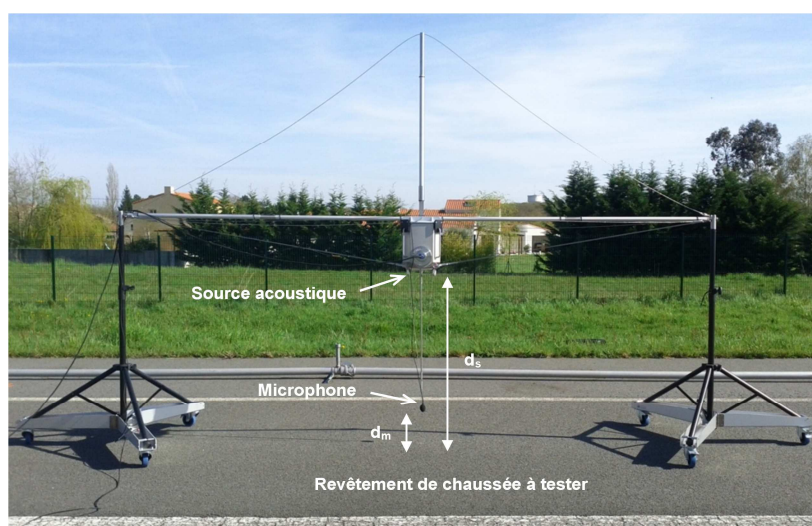


Figure 52 : Système de mesure d'absorption acoustique

Au cours de l'essai, la source et le microphone sont d'abord positionnés verticalement, microphone vers le bas, au centre de la surface à tester. Un signal de type bruit blanc est généré puis envoyé au haut-parleur. Le rapport signal/bruit est amélioré en répétant l'acquisition plusieurs fois et en moyennant de façon synchrone la réponse du microphone. La technique de soustraction des signaux décrite dans [15] est appliquée en retournant le système verticalement, microphone vers le haut, afin d'obtenir la réponse impulsionnelle en champ libre. Cette réponse en champ libre est ensuite soustraite, dans le domaine temporel, à la réponse en présence du revêtement absorbant, de façon à isoler la contribution du signal réfléchi.

Pour un revêtement donné, les mesures d'absorption acoustique ont été réalisées en 5 points autour du Point de Référence (PR) correspondant à la position du microphone utilisé pour la mesure du bruit au passage, comme illustré Figure 53. La surface active qui contribue à la réflexion des ondes acoustiques est de l'ordre de 3 m². Un espacement de 2 m entre chaque point de mesure a donc été choisi afin de couvrir une zone représentative de la surface autour du PR. Pour chaque point de mesure, une mesure en champ libre a également été réalisée.

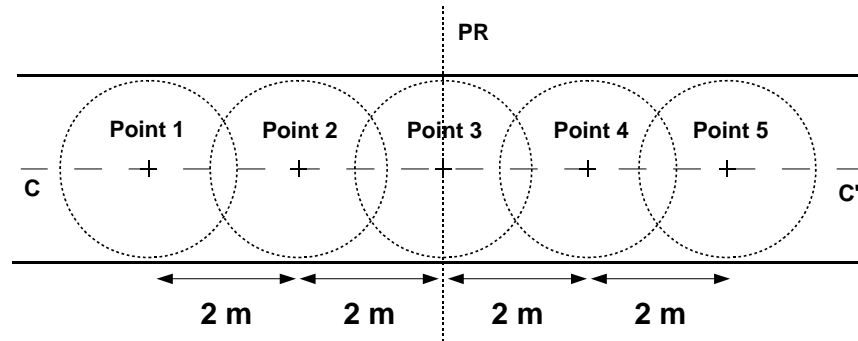


Figure 53 : Points de mesure d'absorption acoustique autour du Point de Référence (PR) correspondant à la position du microphone utilisé pour la mesure de bruit au passage

De très petites valeurs d'absorption acoustique sont souvent mesurées dans la gamme des basses fréquences. Il est très difficile d'obtenir des valeurs précises dans cette gamme. De petites variations dans la détermination des niveaux de pression acoustique, à la fois du signal direct et du signal réfléchi, peuvent induire de grandes imprécisions dans les valeurs d'absorption acoustique. La norme ISO 13472-1 [15] recommande donc un mesurage de référence sur une surface totalement réfléchissante de façon à éviter ce problème et à améliorer la précision de la méthode (Annexe B de la norme). La surface de référence utilisée au cours des essais est la surface ISO de la piste de l'Isttar à Bouguenais, qui est une surface fermée et relativement lisse.

3.3.3.2. Méthode d'analyse des données

La réponse impulsionnelle globale du système obtenue dans le domaine temporel se compose de la réponse impulsionnelle du trajet direct et de la réponse impulsionnelle du trajet réfléchi. Ces deux réponses impulsionnelles sont séparées dans le domaine temporel au moyen d'un traitement adéquat (soustraction du signal et séparation temporelle décrite dans [15]). Les fonctions de transfert du trajet direct $H_d(f)$ et du trajet réfléchi $H_r(f)$ sont obtenues par transformée de Fourier. Le coefficient d'absorption acoustique en bande fine $\alpha(f)$ se calcule alors de la façon suivante :

$$\alpha(f) = 1 - \frac{1}{K_r^2} \left| \frac{H_r(f)}{H_d(f)} \right|^2 \quad (4)$$

où f est la fréquence et $K_r = (d_s - d_m) / (d_s + d_m)$ est un facteur de correction de la divergence géométrique des ondes acoustiques. Le coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave est ensuite aisément obtenu.

Le coefficient d'absorption en bande fine peut ensuite être comparé au modèle prédictif [16] afin d'estimer les paramètres physiques décrivant l'absorption acoustique de la surface de chaussée. D'après ce modèle, le coefficient d'absorption en incidence normale peut être exprimé en fonction de l'impédance de surface spécifique Z :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - 1}{Z + 1} \right|^2 \quad (5)$$

En supposant que la couche située en-dessous de la surface de chaussée absorbante est parfaitement rigide, $Z = Z_c \coth(-ikl)$ où Z_c est l'impédance caractéristique de la surface de chaussée, k est le nombre d'onde complexe du revêtement poreux et l est l'épaisseur de la couche poreuse. Dans [16], Z_c et k sont calculés à partir de trois paramètres physiques caractéristiques de la structure poreuse qui sont la porosité Ω , la résistance spécifique au passage de l'air R_s représentative de la facilité de l'onde sonore à traverser la structure poreuse et un facteur de tortuosité adimensionnel q^2 représentatif du trajet effectif de l'onde sonore dans le matériau prenant en compte les pertes énergétiques liées à la température et à la viscosité de l'air emprisonné dans les pores. Ces paramètres étant difficilement mesurables in situ sur des échantillons représentatifs, ils sont estimés par calage inverse du modèle d'impédance à partir de la courbe d'atténuation sonore expérimentale.

3.3.3.3. Résultats

Pour chaque planche d'essai, le coefficient d'absorption a été mesuré en 5 points puis moyenné dans le domaine fréquentiel en bande fine. À partir de cette valeur moyenne, le coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave a ensuite été calculé. Les résultats sont donnés Figure 54 et montrent des pics d'absorption relativement larges.

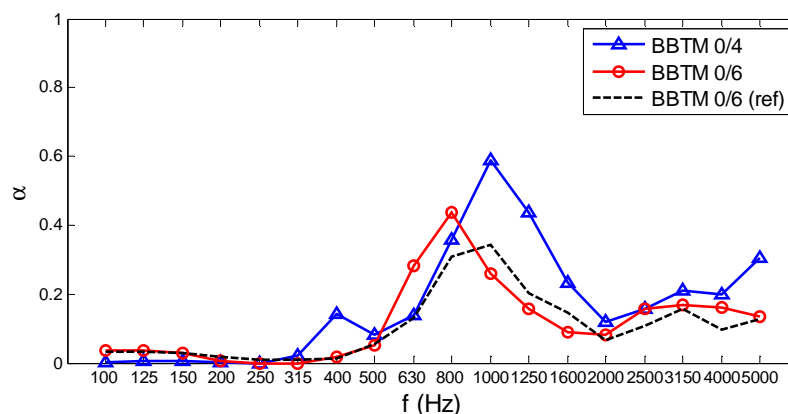


Figure 54 : Coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave mesuré sur le BBTM 0/4 et le BBTM 0/6

Le BBTM 0/4 a un pic d'absorption d'amplitude 0,59 à 1000 Hz alors que le BBTM 0/6 a un pic d'absorption d'amplitude 0,44 à 800 Hz. Les pics d'absorption de ces deux surfaces développées au cours du projet sont plus élevés et plus prononcés que le pic d'absorption à 1000 Hz du BBTM 0/6 de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (planche M2). Cette absorption acoustique optimisée a pour effet une réduction du bruit de contact pneumatique/chaussée dans la gamme de fréquence située autour du pic (cf. 3.3.4).

La Figure 55 donne le coefficient d'absorption moyen en bande fine mesuré sur chaque surface ainsi que la courbe d'absorption théorique du modèle prédictif [16]. Les paramètres physiques du modèle Ω , R_s et q^2 sont donnés Tableau 14. Ils ont été ajustés manuellement de façon à avoir la meilleure concordance entre la mesure et la théorie sur le premier pic d'absorption. L'épaisseur l a été fixée à partir des données de construction de la planche d'essai. Ces paramètres pourront être utilisés à l'avenir pour tenir compte de l'absorption dans les modèles de rayonnement du bruit de contact pneumatique/chaussée.

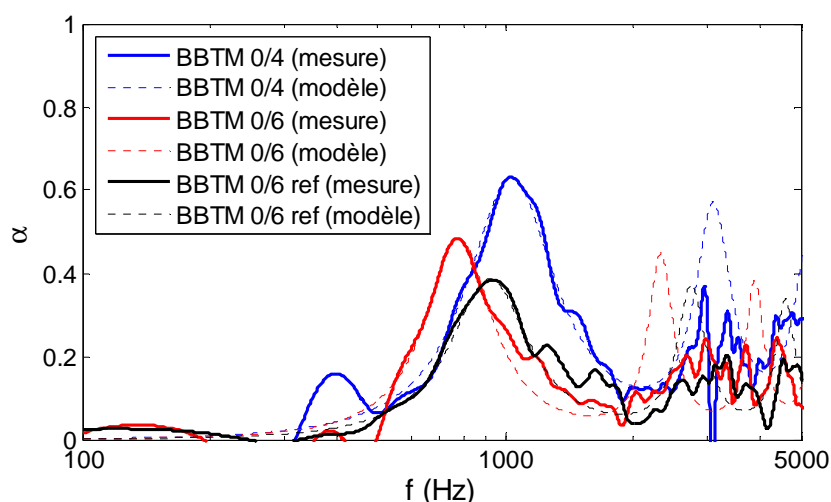


Figure 55 : Coefficient d'absorption en bande fine mesuré sur le BBTM 0/4 et le BBTM 0/6 et recalé sur le modèle prédictif [16]. La référence correspond au BBTM0/6 de la piste de l'Ifsttar (planche M2)

Tableau 14 : Paramètres du modèle d'absorption [16] recalés à partir des courbes expérimentales¹¹

Surface	l (m)	Ω	R_s (Nm ⁻⁴ s)	q^2
BBTM 0/4	0,030	0,18	110000	5,5
BBTM 0/6	0,030	0,13	165000	9,7
BBTM 0/6 (ref)	0,025	0,12	270000	10,0

3.3.4. Mesures de bruit de contact pneumatique/chaussée

3.3.4.1. Équipements et méthode de mesure

Véhicule et pneumatiques d'essais

Le véhicule utilisé pour les mesures de bruit de roulement est un véhicule léger Renault Scénic essence 2 litres (Figure 56). Le véhicule est utilisé exclusivement pour les mesures de bruit de roulement et avait un kilométrage d'environ 45000 km au moment des essais. La masse du véhicule en configuration d'essais, c'est-à-dire avec les opérateurs à l'intérieur et le plein d'essence, a été mesurée en laboratoire. La masse totale du véhicule est d'environ 1540 kg. Par conséquent, la charge sur la roue arrière droite servant pour la mesure en continu du bruit de roulement est d'environ 3300 N.

Deux types de pneumatiques ont été utilisés pour les essais : des pneumatiques à motifs et des pneumatiques lisses (Figure 56), avec priorité aux pneumatiques à motifs lors des essais. Le véhicule d'essais était équipé avec quatre pneumatiques identiques. Les pneumatiques à motifs sont des pneumatiques Michelin Energy E3A de dimensions 195/60 R15. Il s'agit du pneumatique standard pour véhicule de tourisme qui est utilisé depuis plusieurs années en France pour la mesure CPX [12]. Le kilométrage de ces pneumatiques était environ de 9200 km au moment des essais. Les pneumatiques lisses sont des pneumatiques de compétition Avon 16" radial slick de dimensions 210/60 R16 et ont une bande de roulement en gomme dure. Le kilométrage approximatif de ces pneumatiques au moment des essais était d'environ 200 km. La pression de gonflage des deux types de pneumatiques était de 2,2 bars durant les essais. La dureté (shore A) de chaque pneumatique a été mesurée en trois points de la bande de roulement et moyennée. Pour les quatre pneumatiques à motifs, la dureté shore A est de 72,0. Pour les pneumatiques lisses, la dureté shore A est de 54,0 à l'arrière et de 70,5 à l'avant¹².



Figure 56 : Véhicule d'essai Renault Scénic utilisé pour les mesures de bruit de contact pneumatique/chaussée (à gauche) et les deux types de pneumatiques testés (standard ou lisse, à droite)

¹¹ A titre informatif, une laine minérale possède les caractéristiques moyennes suivantes ($\Omega \approx 0,8 - 0,9$; $R_s \approx 10000 - 40000$ Nm⁻⁴s ; $q^2 \approx 1$).

¹² Cette différence peut s'expliquer par une date de commande différente pour les pneumatiques avant reçus quelques mois après les pneumatiques arrière. Bien que la référence des pneumatiques soit identique, il semble que les composants de la bande de roulement aient des raideurs différentes, probablement dû à des séries de production différentes.

Procédure de mesure

La procédure de mesure du bruit de roulement est illustrée Figure 57. Les mesures en continu (CPX, comme Close-ProXimity en anglais) et au passage (CB, comme Coast-By en anglais) ont été réalisées simultanément sur une distance de 20 mètres de long centrée autour du Point de Référence (PR) de la planche d'essais. La configuration d'essai est adaptée de la méthode Coast-By décrite dans [17], mais ici un seul microphone au lieu de deux a été utilisé sur le bas-côté pour la mesure au passage¹³. Le véhicule d'essai traverse la zone d'essais comprise entre les axes AA' et BB' à vitesse constante. La transmission est mise au point mort immédiatement avant de franchir la ligne AA' afin de réduire au maximum l'influence du bruit du moteur sur la mesure au passage.

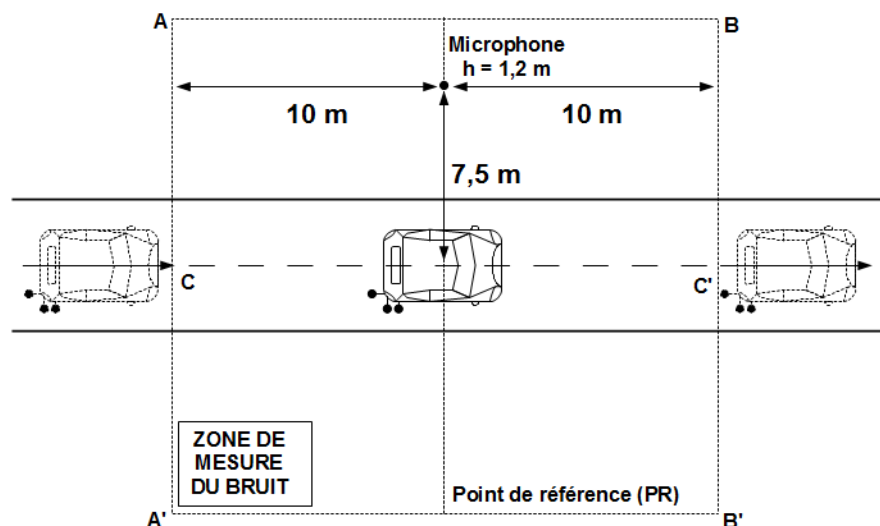


Figure 57: Procédure de mesure du bruit de contact pneumatique/chaussée, simultanément au passage et en continu

Sur chaque planche d'essais plusieurs passages ont été effectués à différentes vitesses de consigne :

- de 40 km/h à 90 km/h par pas de 5 km/h sur le BBTM 0/4 de Mouvaux ;
- de 40 km/h à 110 km/h par pas de 5 km/h sur le BBTM 0/6 de Villeneuve-sur-Lot ;
- de 40 km/h à 70 km/h par pas de 5 km/h sur l'UHPC de Meinerzhagen.

La vitesse réelle du véhicule à chaque passage est mesurée avec précision par le système de mesure CPX. La Figure 58 donne un exemple de mesure CPX et CB simultanée sur la planche en UHPC de Meinerzhagen. Le panneau de déclenchement de la mesure CPX est visible sur la figure et est systématiquement positionné à 22 m en amont du PR. Le microphone de la mesure au passage est positionné à 7,5 m de l'axe de circulation du véhicule et à 1,2 m de la surface du sol.

¹³ La position du microphone d'essai est restreinte par la configuration du site d'essai. A Mouvaux et à Villeneuve-sur-Lot, le microphone était placé du côté opposé aux microphones CPX tandis qu'à Meinerzhagen il était placé du même côté.



Figure 58 : Exemple de mesure CPX et CB simultanée sur la planche d'essai en UHPC de Meinerzhagen

Équipements CPX et CB

Les mesures CPX ont été réalisées conformément à la méthode de mesure française [12]. La totalité du matériel est embarqué et alimenté par le véhicule d'essai. Le véhicule est équipé de deux supports pour microphones près de la roue arrière droite (Figure 59) :

- le premier est fixé au châssis du véhicule et supporte, par l'intermédiaire d'une barre, le microphone 1 situé sur le côté à l'avant de la roue ;
- le second est fixé sur la barre d'attelage du véhicule et supporte, par l'intermédiaire de barres, le microphone 2 situé sur le côté à l'arrière de la roue et le microphone 3 situé derrière la roue.

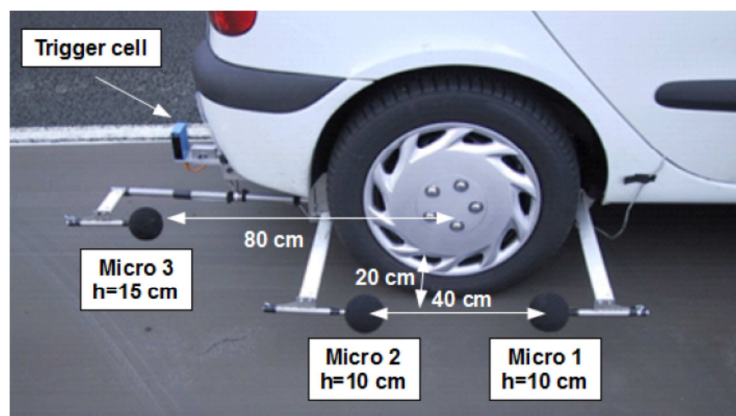


Figure 59 : Système de mesure CPX

Les microphones 1 et 2 respectent les positions spécifiées par la norme ISO/CD 11819-2 [9]. Ils sont fixés à 0,2 m du flanc du pneumatique, à 0,2 m de l'axe de rotation de la roue et à 0,1 m au-dessus du sol. Le microphone 3 est positionné derrière le pneumatique dans le plan médian à 0,8 m de l'axe de la roue et 0,15 m au-dessus du sol.

De nombreuses études ont été menées afin de vérifier l'immunité des mesures face au bruit aérodynamique, à la vibration des supports de montages des microphones, au bruit du groupe de moto-propulsion des autres pneumatiques [18]. Une des conclusions de [19] est que le contenu spectral des mesures en-dessous de 400 Hz et au-delà de 4000 Hz peut être pollué par du bruit aérodynamique lié à l'écoulement turbulent autour des microphones lors du roulement. L'analyse des mesures de bruit de roulement doit donc s'effectuer sur la gamme de fréquence comprise entre 400 Hz et 4000 Hz.

Lors de l'acquisition des mesures, la planche d'essais est discrétisée spatialement dans la direction du roulement en échantillons de longueur Δx correspondant à la distance parcourue lors d'un tour de roue du pneumatique, soit $\Delta x = 1,88$ m. L'échantillonnage est réalisé à l'aide d'un tachymètre délivrant la distance parcourue. Pour chaque échantillon Δx , le système enregistre, pour chaque microphone, le niveau de bruit global en dBA, noté $L_{Aeq}(\Delta x)$, ainsi que les niveaux de bruit par tiers d'octave en dB, notés $L_{eq}(\Delta x, f)$. La vitesse du véhicule V et la position longitudinale sur la planche d'essai sont également enregistrées. Le système d'acquisition est déclenché automatiquement lorsque la cellule infrarouge embarquée sur le

véhicule passe devant un panneau rétro-réfléchissant positionné en entrée de la planche d'essai. Les signaux sont enregistrés à l'aide du logiciel LRPC 3.2 spécialement développé par la société 01dB-Métravib. Les niveaux de pression acoustique pour chaque échantillon de la planche d'essai et pour chaque passage sont récupérés et exportés pour l'analyse des données décrite en 3.3.4.2.

Les mesures au passage ont été réalisées selon les préconisations de la directive européenne 2001/43/EC [20], mais un seul microphone (et non deux) de mesure au passage a été utilisé lors des essais. Le microphone est positionné à 7,5 m de l'axe de circulation du véhicule d'essai et 1,2 m au-dessus du sol. La vitesse du véhicule a été calculée à partir des mesures de vitesse du système CPX. Pour chaque passage, le signal acoustique est enregistré pendant quelques secondes à l'aide d'un enregistreur numérique et sauvegardé dans un fichier wav. Deux fichiers d'étalonnage sont également enregistrés en début et en fin d'essai. Les enregistrements sont ensuite traités à l'aide du logiciel dB Euler 2.0 [21]. Le traitement commence par un étalonnage des signaux temporels puis le niveau de bruit moyen pondéré exponentiellement en temps est calculé d'après la norme NF EN 61672-1 [22] :

$$L_{AF}(t) = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{p_0^2} \left(\frac{1}{\tau_F} \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-\frac{t-\xi}{\tau_F}} d\xi \right) \right] \quad (6)$$

où A symbolise la pondération A, F correspond à la pondération rapide en temps, $\tau_F = 0,125$ s est la constante de temps pour la pondération rapide en temps, p_A est le signal instantané de pression acoustique pondérée A et p_0 est la pression acoustique de référence de 20 μ Pa. Suivant les recommandations de la norme NF EN ISO 11819-1 [10], pour chaque passage de véhicule le niveau de pression acoustique maximum pondéré A, noté L_{AFmax} , est identifié à partir du niveau de bruit temporel $L_{AF}(t)$. Les niveaux de bruit en tiers d'octave, notés $L_{Fmax}(f)$, sont également obtenus entre 100 Hz et 5000 Hz en prenant le spectre à l'instant de L_{AFmax} . L'analyse des données est décrite en 3.3.4.2.

3.3.4.2. Méthode d'analyse des données

Principe

L'augmentation des niveaux de bruit globaux (L_{AFmax} et L_{Aeq}) en fonction du logarithme décimal de la vitesse du véhicule V est un résultat bien connu de la littérature. La relation s'écrit :

$$L_{A\alpha}(V) = a_{L_{A\alpha}} + b_{L_{A\alpha}} \log_{10}(V) \quad (7)$$

où α peut être max ou eq suivant la méthode de mesure étudiée et la valeur de la pente $b_{L_{A\alpha}}$ dépend des propriétés du pneu et de la surface de chaussée, mais est généralement comprise entre 20 et 40 dBA par décade de vitesse pour les véhicules légers.

Le même type de relation peut être supposé pour les niveaux de bruit en tiers d'octave :

$$L_{\alpha}(V, f) = a_{L_{\alpha}}(f) + b_{L_{\alpha}}(f) \log_{10}(V) \quad (8)$$

Par la suite, la dépendance en vitesse des niveaux de bruit CPX et CB sera étudiée pour les niveaux globaux et les niveaux en tiers d'octave. Les données sont analysées en utilisant la méthode statistique de simple régression linéaire décrite en détail dans [23]. Les paramètres a et b de la régression sont ajustés sur les données expérimentales en utilisant la méthode des moindres carrés. Le niveau de bruit étant une variable aléatoire, l'intervalle de confiance à 95% des paramètres a et b est également calculé. L'intervalle de confiance à 95% de l'écart-type σ des niveaux de bruit est également calculé.

Méthode d'analyse des données CPX

L'analyse des mesures de bruit CPX requiert une attention particulière en raison de la pollution possible des données par le bruit aérodynamique [19] pour des vitesses supérieures à 90 km/h et les résultats fréquentiels en-dessous de 400 Hz et au-delà de 4000 Hz. Par conséquent, pour chaque tiers d'octave entre 400 Hz et 4000 Hz, l'équation suivante est ajustée :

$$L_{eq}(V, f) = a_{L_{eq}}(f) + b_{L_{eq}}(f) \log_{10}(V) \quad (9)$$

où $L_{eq}(V, f)$ est la moyenne arithmétique des niveaux de bruit sur les deux microphones latéraux (microphones 1 et 2) à la vitesse V et à la fréquence centrale de tiers d'octave f . La régression linéaire est effectuée sur l'ensemble des échantillons ($\log_{10}(V(\Delta x)), L_{eq}(V(\Delta x), f)$) mesurés dans la zone d'analyse du bruit, ce qui correspond à 13 échantillons de longueur $\Delta x = 1,88$ m centrés autour du PR. Le niveau CPX global est ensuite recomposé sur la gamme de fréquence valide :

$$L_{rAeq}(V) = 10 \log_{10} \left(\sum_{f=f_1}^{f_2} 10^{L_{Aeq}(f)/10} \right) \quad (10)$$

où $f_1 = 400$ Hz et $f_2 = 4000$ Hz. Ensuite, le modèle de l'équation (7) est appliqué au niveau global recomposé pondéré A :

$$L_{rAeq}(V) = a_{L_{rAeq}} + b_{L_{rAeq}} \log_{10}(V) \quad (11)$$

Méthode d'analyse des données CB

L'analyse des mesures de bruit CB est basé sur la même méthode que pour les mesures CPX. Cependant, il n'y a pas d'influence du bruit aérodynamique pour cette méthode car le microphone reste fixe, sur le bord de voie, au cours des essais. La régression est donc directement effectuée sur les niveaux de bruit globaux mesurés :

$$L_{Amax}(V) = a_{L_{Amax}} + b_{L_{Amax}} \log_{10}(V) \quad (12)$$

La régression est effectuée sur l'ensemble des points ($\log_{10}(V_m), L_{Amax}(V_m)$) où V_m est la vitesse moyenne mesurée avec le système CPX sur les 13 échantillons centrés autour du PR. Une analyse similaire est réalisée pour chaque tiers d'octave :

$$L_{max}(V, f) = a_{L_{max}}(f) + b_{L_{max}}(f) \log_{10}(V) \quad (13)$$

permettant d'estimer les spectres de bruit au passage.

3.3.4.3. Résultats et comparaisons

Résultats pour le BBTM 0/4 de Mouvaux

Les niveaux de bruit mesurés en continu et au passage sur le BBTM 0/4 de Mouvaux sont donnés Figure 60 dans le cas du pneumatique à motifs. Pour le niveau de bruit mesuré en continu, chaque point représente le niveau de bruit $L_{rAeq}(V(\Delta x))$ mesuré en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse à la position Δx . Pour la mesure au passage, chaque point représente le niveau de bruit $L_{Amax}(V_m)$ en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse moyenne V_m mesurée avec le système CPX. La droite de régression calculée est également tracée en trait plein noir ainsi que les hyperboles de confiance à 95 % en traits pointillés rouges. Les niveaux de bruit estimés aux vitesses de référence de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h sont également représentés en triangles rouges avec leurs barres d'incertitude. La pente de la droite de régression b , l'ordonnée à l'origine a , le coefficient de corrélation de la régression ainsi que l'intervalle de confiance à 95 % de l'écart-type sont également indiqués sur la figure. La pente de la droite de régression est de $40,8 \pm 1,1$ dBA/dec pour la mesure en continu et de $33,6 \pm 2,1$ dBA/dec pour la mesure au passage. Cette différence de pente entre mesure en continu et mesure au passage est relativement importante en comparaison avec les autres résultats qui suivront.

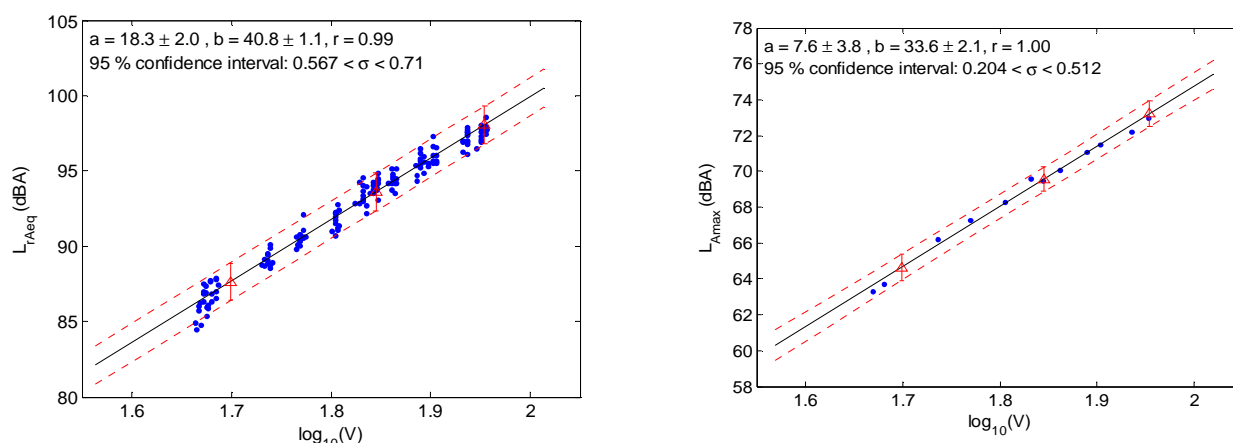


Figure 60 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/4

Le Tableau 15 donne les niveaux de bruit estimés à partir de la droite de régression à différentes vitesses de passage du véhicule. La vitesse de référence du site de 70 km/h est indiquée en rouge et en caractères gras. Les données en italiques sont des valeurs extrapolées, c'est-à-dire que cette gamme de vitesse n'a pas été couverte lors des essais. Ainsi, le niveau de bruit à 70 km/h pour le pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/4 est de 93,6 dBA proche de la source et de 69,6 dBA en bord de voie.

Tableau 15 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/4 dans le cas du pneumatique à motifs

V (km/h)	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
L_{rAeq} (dBA)	87,6	90,9	93,6	96,0	98,1	99,9	101,6
L_{Amax} (dBA)	64,6	67,3	69,6	71,5	73,2	74,8	76,1

La Figure 61 donne les spectres de bruit par bande de tiers d'octave mesurés par la méthode en continu et par la méthode au passage. Les niveaux CPX sont donnés sur leur gamme de validité fréquentielle comprise entre 400 Hz et 4000 Hz. Il s'agit des spectres estimés aux vitesses de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h à partir des régressions statistiques sur chaque bande de tiers d'octave, d'où les barres d'erreur. On constate un décalage en fréquence du niveau maximum du spectre localisé à 630 Hz à 50 km/h puis à 800 Hz à 70 km/h et 90 km/h. Cette fréquence coïncide avec la taille caractéristique des pains de gomme du pneumatique qui est de l'ordre de 2,5 cm. Avec ce raisonnement, à 90 km/h, le pic devrait être localisé à 1000 Hz, mais il est atténué par l'absorption acoustique du revêtement qui est maximale à 1000 Hz. Ce décalage du pic du spectre de bruit en fonction de la fréquence est également observé sur les spectres de la mesure au passage (Figure 61). Une conséquence de ce décalage est la faible influence de la vitesse du véhicule sur les niveaux de bruit à 400 Hz, 500 Hz et 630 Hz. Les niveaux de bruit à basse fréquence, entre 100 Hz et 315 Hz, ont des amplitudes plus importantes qu'à hautes fréquences au-delà de 1600 Hz.

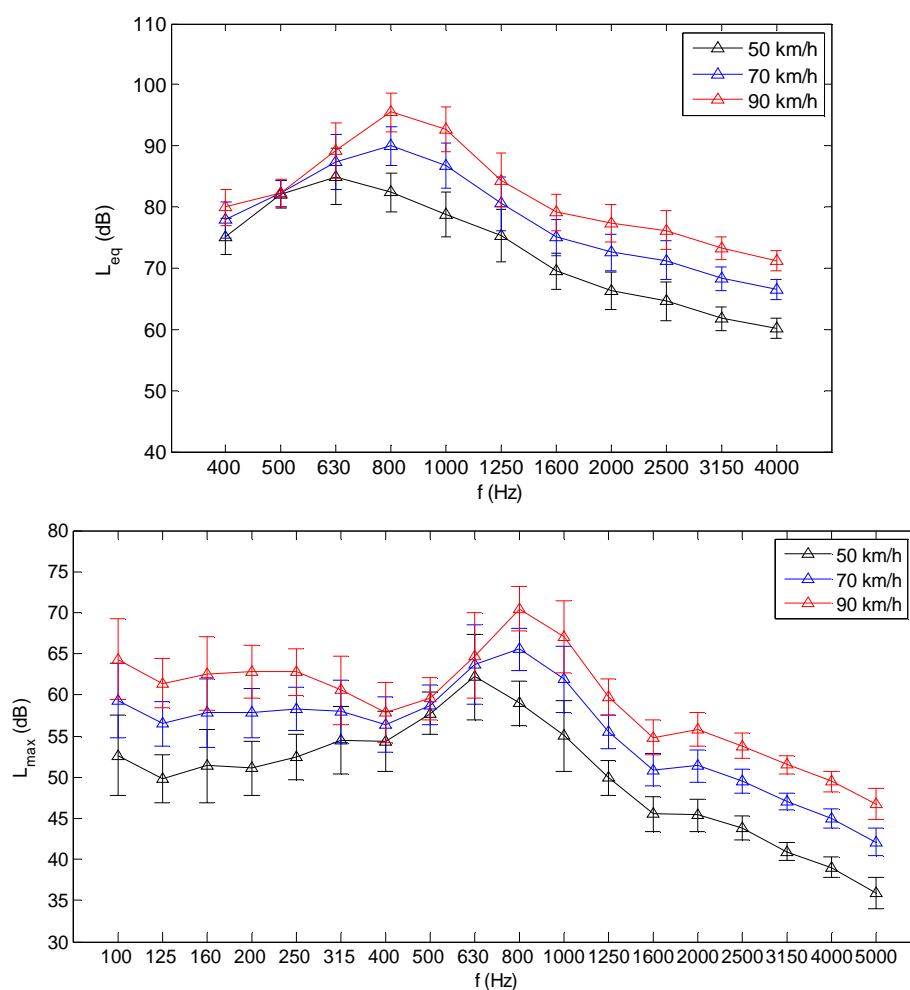


Figure 61 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/4

Résultats pour le BBTM 0/6 de Villeneuve-sur-Lot

Les niveaux de bruit mesurés en continu et au passage sur le BBTM 0/6 de Villeneuve-sur-Lot sont donnés Figure 62 dans le cas du pneumatique à motifs. La pente de la droite de régression est de $32,8 \pm 0,8$ dBA/dec pour la mesure en continu et de $32,3 \pm 1,7$ dBA/dec pour la mesure au passage. Ces valeurs sont remarquablement proches.

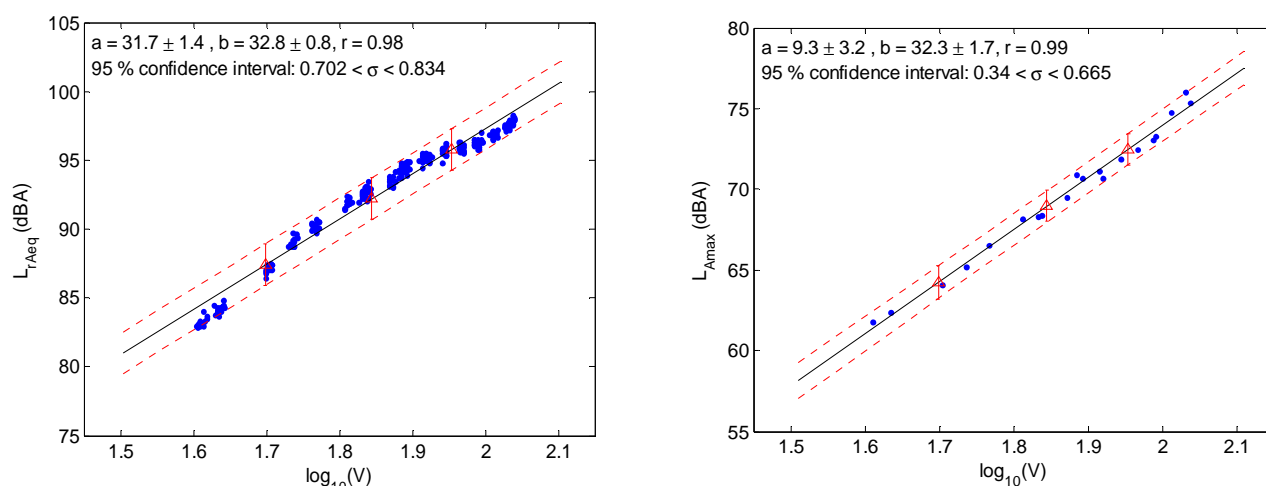


Figure 62 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/6

Le Tableau 16 donne les niveaux de bruit estimés à partir de la droite de régression à différentes vitesses de passage du véhicule. La vitesse de référence du site de 90 km/h est indiquée en rouge et en caractères gras. Ainsi, le niveau de bruit à 90 km/h pour le pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/6 est de 95,8 dBA proche de la source et de 72,5 dBA en bord de voie.

Tableau 16: Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/6 dans le cas du pneumatique à motifs

V (km/h)	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
L_{rAeq} (dBA)	87,4	90,0	92,2	94,1	95,8	97,3	98,6
L_{Amax} (dBA)	64,2	66,8	69,0	70,8	72,5	74,0	75,3

La Figure 63 donne les spectres de bruit par bande de tiers d'octave mesurés par la méthode en continu et par la méthode au passage aux vitesses de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h. Pour les niveaux CPX, on constate un décalage en fréquence du niveau maximum du spectre localisé à 630 Hz à 50 km/h, puis autour de 630-800 Hz à 70 km/h et autour de 800-1000 Hz à 90 km/h. Comme pour le BBTM 0/4, cette fréquence coïncide avec la taille caractéristique des pains de gomme du pneumatique. À 70 km/h, le pic est atténué par l'absorption acoustique du revêtement qui est maximale à 800 Hz. Ce décalage du pic du spectre de bruit en fonction de la fréquence est également présent sur les spectres au passage à 50 km/h et 90 km/h. À 70 km/h, le pic à 800 Hz disparaît en raison de l'absorption acoustique. Une conséquence de ce décalage est la faible influence de la vitesse du véhicule sur les niveaux de bruit à 400 Hz, 500 Hz et 630 Hz. Les niveaux de bruit à basse fréquence, entre 100 Hz et 315 Hz, ont des amplitudes plus importantes qu'à hautes fréquences au-delà de 2000 Hz.

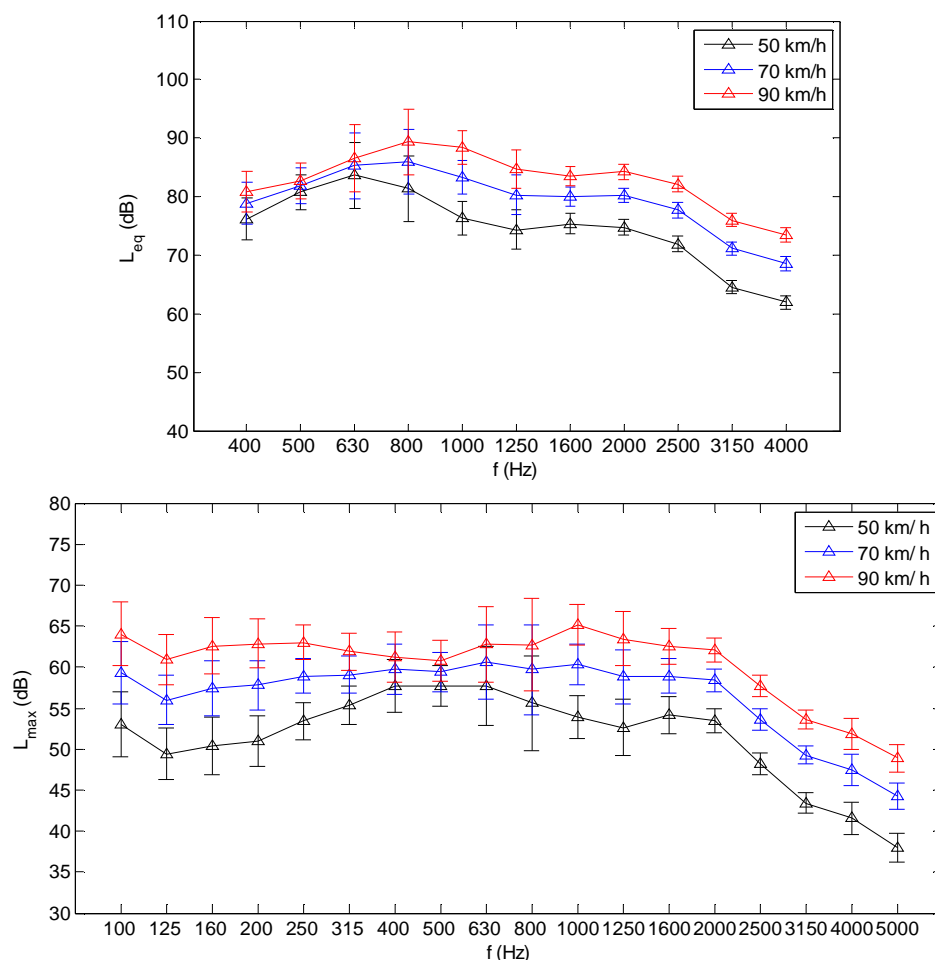


Figure 63 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/6

Les niveaux de bruit mesurés en continu et au passage sur le BBTM 0/6 de Villeneuve-sur-Lot sont donnés Figure 64 dans le cas du pneumatique lisse. Les données pour la mesure CPX sont étonnamment dispersées. Cependant, la pente de la droite de régression est de $29,0 \pm 0,9$ dBA/dec pour la mesure en continu et de $30,9 \pm 1,0$ dBA/dec pour la mesure au passage. Ces valeurs restent très proches.

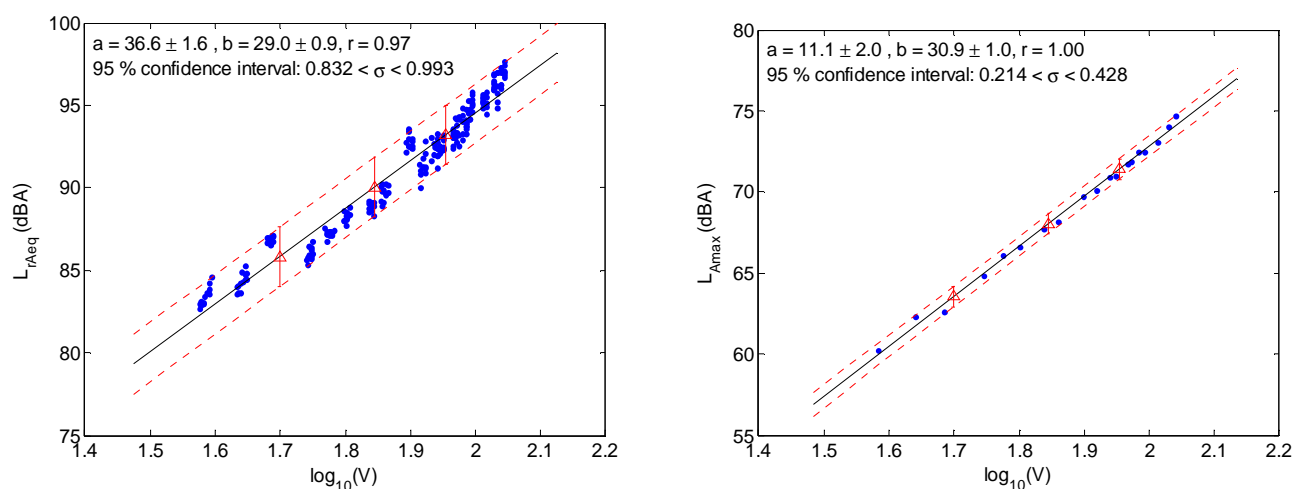


Figure 64 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique lisse roulant sur le BBTM 0/6

Le Tableau 17 donne les niveaux de bruit estimés à partir de la droite de régression à différentes vitesses de passage du véhicule. Le niveau de bruit à 90 km/h pour le pneumatique lisse roulant sur le BBTM 0/6 (en rouge et en caractères gras) est de 93,2 dBA proche de la source, soit 2,6 dBA moins bruyant que le pneumatique à motifs, et de 71,4 dBA en bord de voie, soit 1,1 dBA moins bruyant que le pneumatique lisse.

Tableau 17 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/6 dans le cas du pneumatique lisse

V (km/h)	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
L_{rAeq} (dBA)	85,8	88,1	90,1	91,7	93,2	94,5	95,7
L_{Amax} (dBA)	63,5	66,0	68,0	69,8	71,4	72,8	74,1

La Figure 65 donne les spectres de bruit par bande de tiers d'octave mesurés par la méthode en continu et par la méthode au passage aux vitesses de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h. Aucun décalage en fréquence des spectres n'est observé en raison de l'absence de pains de gomme sur la bande de roulement du pneumatique. Pour les niveaux CPX, l'allure des spectres est relativement plate avec toutefois une valeur minimale à 1250 Hz et des maxima localisés à 630 Hz et à 2000 Hz. Les spectres au passage ont une allure moins plate, mais le pic à 2000 Hz est toujours présent aux différentes vitesses.

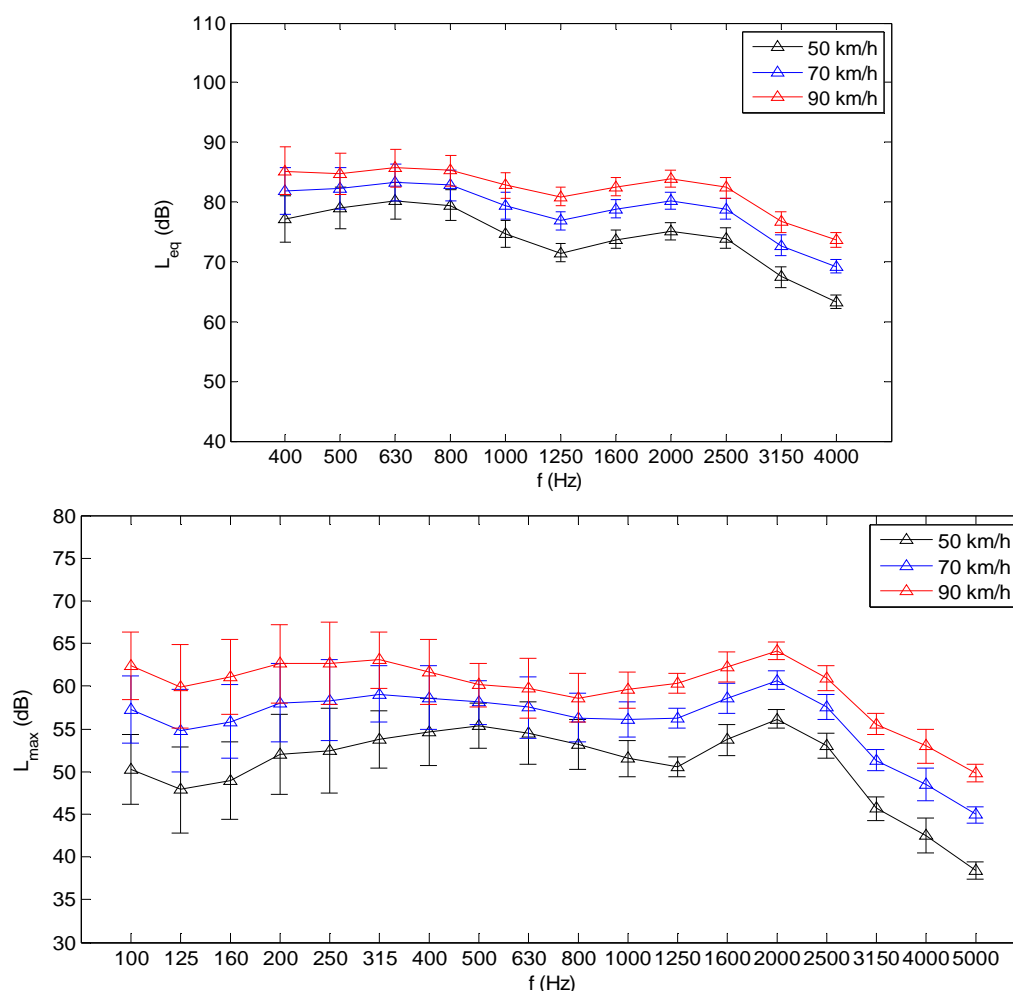


Figure 65 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique lisse roulant sur le BBTM 0/6

Résultats pour l'UHPC de Meinerzhagen

Les niveaux de bruit mesurés en continu sur l'UHPC de Meinerzhagen sont donnés Figure 66 dans le cas du pneumatique à motifs. La pente de la droite de régression est de $45,9 \pm 1,5$ dBA/dec, ce qui est une valeur élevée.

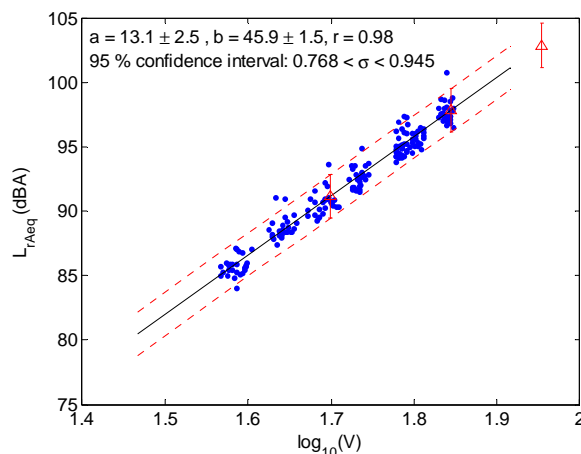


Figure 66 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur l'UHPC

Le Tableau 18 donne les niveaux de bruit estimés à partir de la droite de régression à différentes vitesses de passage du véhicule. La vitesse de référence du site de 50 km/h est indiquée en rouge et en caractères gras. Le niveau de bruit à cette vitesse pour le pneumatique à motifs roulant sur l'UHPC est de 91,1 dBA à proximité de la source.

Tableau 18 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche UHPC dans le cas du pneumatique à motifs

V (km/h)	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
L_{rAeq} (dBA)	91,1	94,8	97,8	100,5	102,9	105,0	106,9

La Figure 67 donne les spectres de bruit par bande de tiers d'octave mesurés par la méthode en continu aux vitesses de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h. À 50 km/h, le spectre est quasiment plat, tandis qu'à 70 km/h et 90 km/h un maximum est observé à 630 Hz. Cette fréquence correspond à une taille caractéristique comprise entre 30 et 40 cm, qui pourrait correspondre à la taille élémentaire des carreaux de ciment constituant les dalles préfabriquées. La vitesse du véhicule n'a pas d'influence sur le niveau de bruit à 400 Hz.

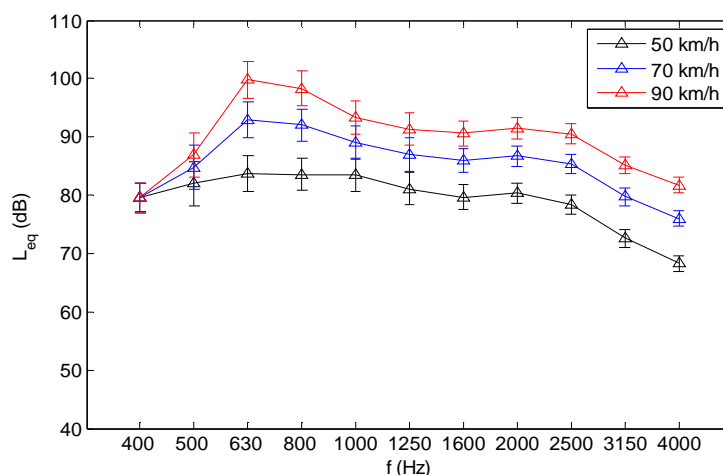


Figure 67 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur l'UHPC

Les niveaux de bruit mesurés en continu sur l'UHPC de Meinerzhagen sont donnés Figure 68 dans le cas du pneumatique lisse. La pente de la droite de régression est de $31,0 \pm 1,3$ dBA/dec, ce qui est inférieur à celle obtenue pour le pneumatique à motifs.

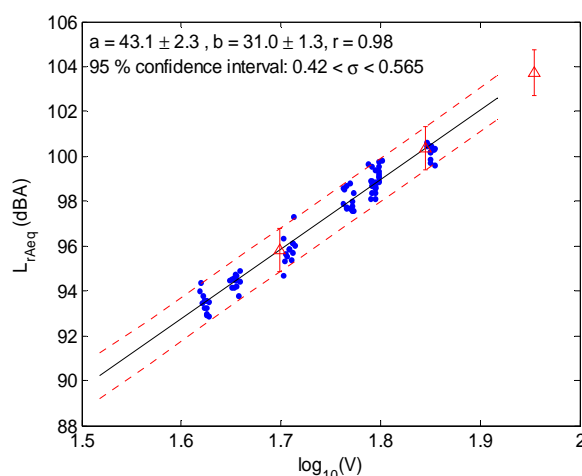


Figure 68 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique lisse roulant sur l'UHPC

Le Tableau 19 donne les niveaux de bruit estimés à partir de la droite de régression à différentes vitesses de passage du véhicule. La vitesse de référence du site de 50 km/h est indiquée en rouge et en caractères gras. Le niveau de bruit à cette vitesse pour le pneumatique lisse roulant sur l'UHPC est de 95,8 dBA à proximité de la source, soit 4,7 dBA plus élevé que le niveau mesuré pour le pneumatique à motifs.

Tableau 19 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche UHPC dans le cas du pneumatique lisse

V (km/h)	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0
L_{rAeq} (dBA)	95,8	98,3	100,3	102,2	103,7	105,2	106,4

La Figure 69 donne les spectres de bruit par bande de tiers d'octave mesurés par la méthode en continu aux vitesses de 50 km/h, 70 km/h et 90 km/h. Le spectre est quasiment plat à toutes les vitesses, avec toutefois un léger pic observé à 800 Hz.

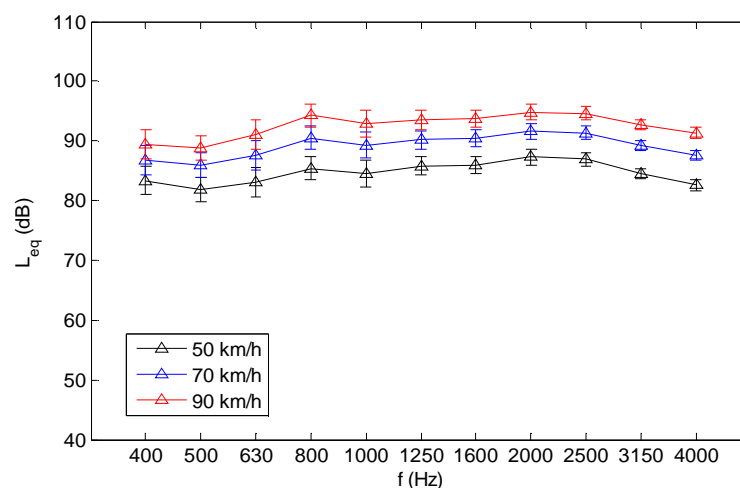


Figure 69 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique lisse roulant sur l'UHPC

Comparaison des différentes planches d'essais

Étant donné les vitesses réglementaires différentes sur les trois sites d'essais, les résultats sont comparés Tableau 20 dans le cas du pneumatique à motifs à la vitesse de référence de 70 km/h. L'intervalle de confiance à 95 % est également donné dans le tableau pour chaque valeur estimée. Les niveaux de bruit sur les planches M2 (BBTM 0/6 (ref)) et E2 (BBSG 0/10 (ref)) de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais sont également renseignés. Il faut noter que ces résultats n'ont pas été corrigés en température car les températures de l'air sur les différents sites au cours des essais étaient toutes proches de 15°C. De plus, l'UHPC en béton de ciment ne nécessite pas de correction des niveaux de bruit en fonction de la température. Le niveau CPX du BBTM 0/4 est très proche de celui du BBTM 0/6 (ref), tandis que le BBTM 0/6 est moins bruyant de 1,4 dBA. En comparaison avec le BBSG 0/10 (revêtement fermé de référence en France), la réduction de bruit est de 2,1 dBA pour le BBTM 0/4 et 3,5 dBA pour le BBTM 0/6. La pente de la régression pour les BBTM 0/4 et BBTM 0/6 testés est étonnamment élevée par rapport à la référence (BBTM 0/6 (ref)). Concernant l'UHPC, le niveau CPX et la pente sont très élevés : 2,1 dBA plus bruyant que le revêtement fermé de référence. Les résultats de mesure au passage montrent qu'en bord de voie les niveaux de bruit pour le BBTM 0/4 et le BBTM 0/6 sont réduits respectivement de 1,0 dBA et 1,6 dBA par rapport au BBTM 0/6 de référence et de 5,0 dBA et 5,6 dBA par rapport au BBSG 0/10 de référence. Les pentes de la régression restent élevées et proches de celle du BBSG 0/10.

Tableau 20 : Comparaison des niveaux de bruit à 70 km/h pour le pneumatique à motifs

Surface	$L_{Aeq}(70)$ (dBA)	b_{LAeq} (dBA/dec)	$L_{Amax}(70)$ (dBA)	b_{LAmax} (dBA/dec)
BBTM 0/4	$93,6 \pm 1,3$	$40,8 \pm 1,1$	$69,6 \pm 0,7$	$33,6 \pm 2,1$
BBTM 0/6	$92,2 \pm 1,5$	$32,8 \pm 0,8$	$69,0 \pm 1,0$	$32,3 \pm 1,7$
UHPC	$97,8 \pm 1,7$	$45,9 \pm 1,5$	-	-
BBTM 0/6 (ref)	$93,5 \pm 1,0$	$23,0 \pm 1,2$	$70,6 \pm 1,0$	$22,4 \pm 4,0$
BBSG 0/10 (ref)	$95,7 \pm 0,9$	$33,7 \pm 1,0$	$74,6 \pm 1,0$	$32,0 \pm 4,0$

Les Figures 70 et 71 donnent respectivement les spectres en tiers d'octave des différentes planches pour les mesures CPX et CB dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 70 km/h. Les spectres du BBTM 0/4 et du BBTM 0/6 (ref) sont très proches : après un pic marqué à 800 Hz, les niveaux de bruit

sont très fortement atténués à hautes fréquences en raison du pic d'absorption de ces surfaces à 1000 Hz et des niveaux de texture élevés pour ces surfaces aux longueurs d'onde inférieures à 8 mm, favorisant la diminution du pompage d'air. En-dessous de 1000 Hz le BBTM 0/6 est plus silencieux que le BBTM 0/6 (ref) en raison de niveaux de texture enveloppée plus faible réduisant l'excitation vibratoire du pneumatique. Les niveaux de bruit CPX et CB du BBTM 0/6 sont plus faibles que ceux du BBTM 0/4 en-dessous de 1250 Hz en raison du pic d'absorption à 800 Hz, fréquence correspondant à la périodicité des impacts des pains de gomme à 70 km/h. Ainsi, le spectre au passage pour le BBTM 0/6 a une allure plate jusqu'à 2000 Hz, comme il est souvent observé pour un pneumatique lisse. Les niveaux CPX de l'UHPC sont plus élevés que ceux du BBSG 0/10 entre 400 Hz et 800 Hz et entre 2000 Hz et 4000 Hz. Sur la plage 1000 Hz – 1600 Hz, les niveaux sont assez proches.

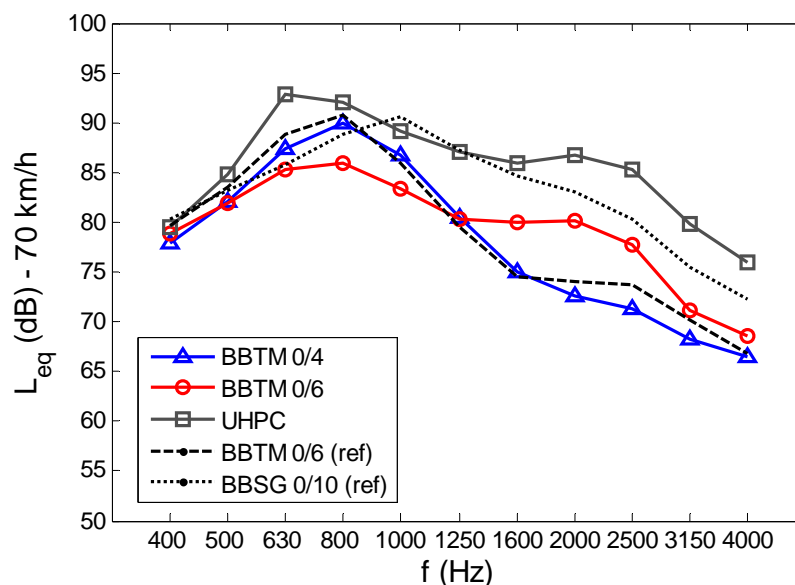


Figure 70 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique à motifs

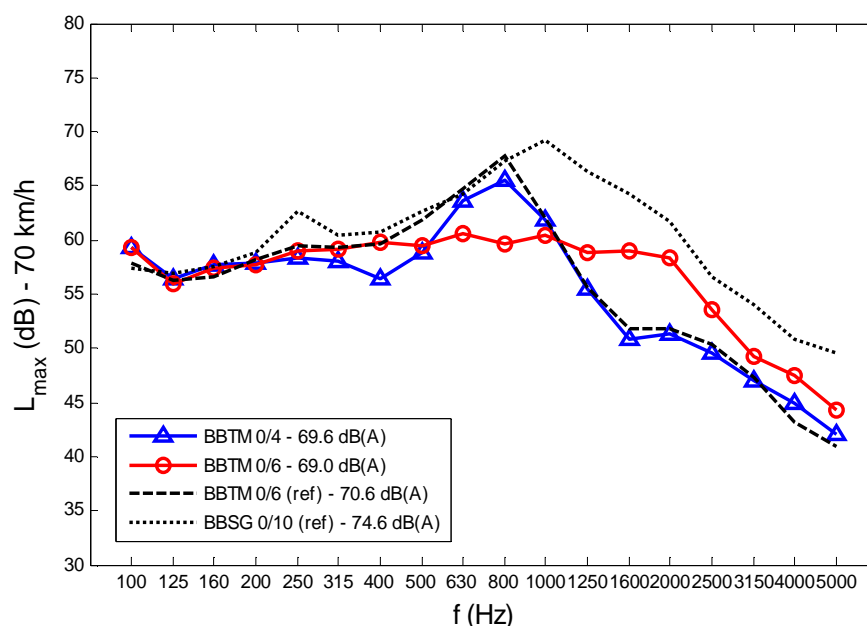


Figure 71 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure au passage dans le cas du pneumatique à motifs

Les niveaux de bruit globaux CPX et CB sont comparés dans le Tableau 21 dans le cas du pneumatique lisse à la vitesse de référence de 70 km/h. Le niveau CPX du BBTM 0/6 est inférieur de 1,3 dBA à celui du BBTM 0/6 (ref), En comparaison avec le BBSG 0/10, la réduction de bruit est de 6,6 dBA pour le BBTM 0/6.

Concernant l'UHPC, le niveau CPX est très élevé : 3,7 dBA plus bruyant que le revêtement fermé de référence. Les résultats de mesure au passage montrent qu'en bord de voie les niveaux de bruit pour le BBTM 0/6 sont réduits de 0,5 dBA par rapport au BBTM 0/6 de référence et de 8,3 dBA par rapport au BBSG 0/10 de référence.

Tableau 21 : Comparaison des niveaux de bruit à 70 km/h pour le pneumatique lisse

Surface	$L_{Aeq}(70)$ (dB(A))	b_{LAeq} (dB(A)/dec)	$L_{Amax}(70)$ (dB(A))	b_{LAmax} (dB(A)/dec)
BBTM 0/6	$90,1 \pm 1,8$	$29,0 \pm 0,9$	$68,0 \pm 0,6$	$30,9 \pm 1,0$
UHPC	$100,4 \pm 1,0$	$31,0 \pm 1,3$	-	-
BBTM 0/6 (ref)	$91,4 \pm 1,5$	$24,2 \pm 3,0$	$68,5 \pm 1,0$	$24,9 \pm 6,5$
BBSG 0/10 (ref)	$96,7 \pm 0,9$	$26,6 \pm 1,1$	$76,3 \pm 1,2$	$26,9 \pm 4,6$

Les Figures 72 et 73 montrent que le BBTM 0/6 est moins bruyant que le BBSG 0/10 sur toute la gamme de fréquences dans le cas du pneumatique lisse, alors qu'à l'inverse les niveaux CPX pour l'UHPC sont plus élevés sur toute la gamme de fréquences.

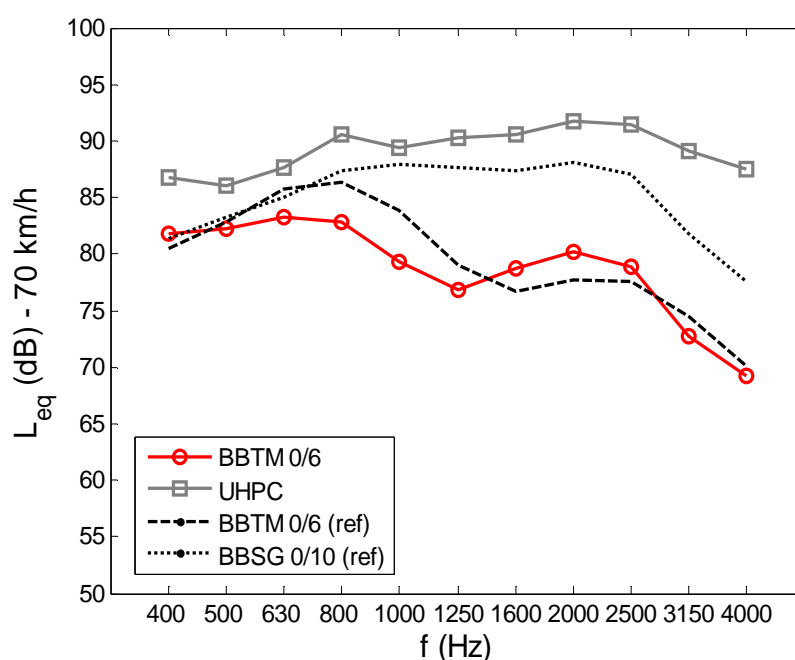


Figure 72 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique lisse

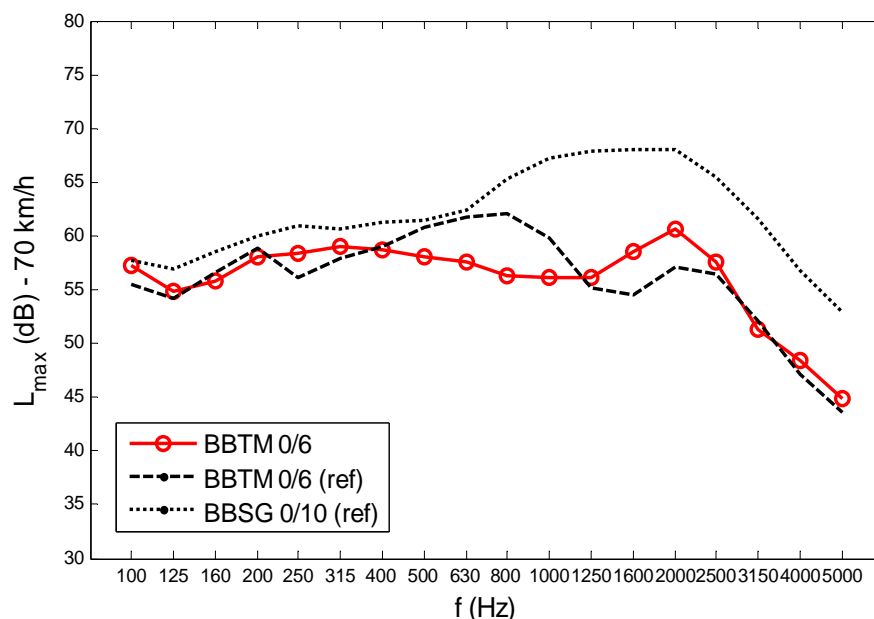


Figure 73 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure au passage dans le cas du pneumatique lisse

3.3.4.4. Quelques premières conclusions

De l'ensemble de ces mesures, nous pouvons dresser les premières conclusions suivantes :

- Si l'on considère les deux BBTM, les résultats de mesure tant en méthodes au passage (CB) qu'en continu (CPX) montrent qu'ils produisent des niveaux sonores proches (différence entre les deux revêtements de l'ordre du décibel), très légèrement inférieurs à la moyenne représentative de leur classe de revêtements R1¹⁴. Cependant, il ne nous semble pas opportun d'établir une classification trop rapide car ils n'ont pas le même âge et n'ont pas été soumis au même trafic. Par comparaison à la référence en BBSG 0/10, nous observons un gain voisin de 4-5 dBA correspondant à une diminution de trafic de l'ordre d'un facteur 2,5 à 3.
- Si on regarde attentivement les résultats du BBTM 0/4, nous constatons que malgré son âge (5 ans), ses caractéristiques acoustiques tant en termes de bruit de roulement que d'absorption ne se sont pas dégradées de façon importante (environ 3 dBA sur la mesure CPX). Ceci lui permet d'être toujours considéré comme un revêtement peu bruyant. Il serait par ailleurs intéressant de reproduire les mêmes mesures sur le BBTM 0/6 après cinq années de mise en service afin d'évaluer la pérennité de ses performances dans le temps comme nous avons pu le faire pour le BBTM 0/4.
- Concernant le revêtement UHPC allemand, les premiers résultats des mesures effectuées par l'Ifsttar montrent que le niveau sonore CPX à 70 km/h est supérieur de 5 dBA environ à celui des BBTM et légèrement supérieur au BBSG 0/10 de référence. En revanche, il est moins bruyant de 1 à 2 dBA que la référence allemande en DAC 0/11. Ces premiers résultats sont encourageants et devraient même s'améliorer lorsque la technique de jointure entre les différentes dalles de béton aura été optimisée.
- Concernant les spectres de texture, les deux BBTM ont des spectres très proches, avec des amplitudes plus élevées que le BBSG 0/10 de référence ce qui leur confère d'excellentes caractéristiques d'adhérence. En revanche, le spectre du revêtement UHPC est beaucoup plus chahuté que ceux des revêtements plus conventionnels. On y retrouve notamment des pics représentatifs des rainures entre les motifs avec des valeurs d'amplitude assez élevées au niveau des pics dans les moyennes longueurs d'onde.

¹⁴ Ceci correspond à la classe des revêtements peu bruyants répertoriés dans la base d'émission de la Nouvelle Méthode française de Préviation du Bruit de trafic NMPB 08.

4. Tâche n°3 : Amélioration des modèles de prévision du bruit et de la DEUFRABASE

4.1. Base de données texture/bruit pour les modèles de prévision du bruit

Dans le but d'améliorer les modèles de prévision du bruit de contact pneumatique/chaussée, des mesures de bruit de roulement et de propriétés de surfaces (texture et absorption acoustique) ont été réalisées sur une large gamme de surfaces routières de référence localisées sur des pistes d'essais en France et en Allemagne. Les mesures de texture et d'absorption acoustique constituent des données d'entrée indispensables aux modèles de prévision, qu'ils soient basés sur une approche statistique hybride ou une approche purement physique. Les mesures de bruit de roulement constituent à la fois des données d'entrée pour les modèles statistiques hybrides et des données de validation des calculs dans le cas des modèles physiques déterministes.

4.1.1. Sites d'essais et revêtements testés

4.1.1.1. Piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (France)

Une première campagne de mesure de texture 3D et de bruit a été réalisée sur 11 planches d'essais de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (France) en avril et en juin 2013. Un schéma d'ensemble de la piste est donné Figure 74, indiquant l'emplacement de chaque planche. Les noms des 11 revêtements testés sont indiqués en caractères gras et le sens de circulation du véhicule au cours des essais est indiqué par une flèche.

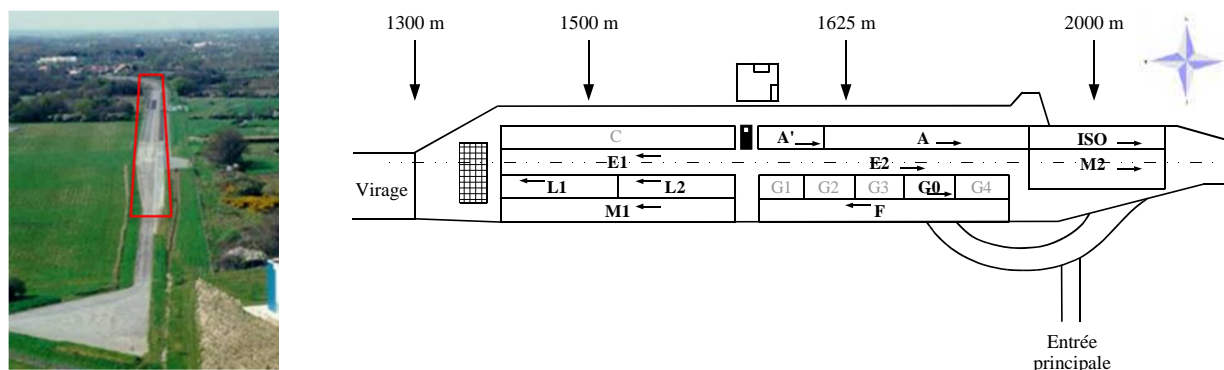






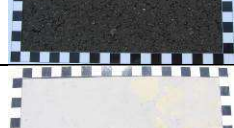



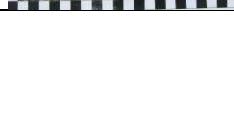


Figure 74: Vue aérienne de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (à gauche) et ses différentes planches d'essais (à droite). Les revêtements testés apparaissent en caractères gras, le sens de mesure et la trace de roulement sont indiqués par une flèche

Chaque planche est revêtue d'une couche de roulement ayant des caractéristiques de surface particulières. Ces propriétés sont décrites dans le Tableau 22, donnant également un aperçu de chaque surface, son année de mise en œuvre, le Point de Référence (PR) précis de mesure du bruit au passage et le sens de circulation au cours des essais. Le PR est également utilisé pour les mesures de propriétés de surface (texture 3D et absorption acoustique). Parmi les surfaces testées, 9 d'entre elles sont des surfaces fermées n'ayant pas de propriété d'absorption acoustique : A*, E1, E2, F, G0, ISO, L1, L2 et M1. Les deux autres surfaces A et M2 sont absorbantes.

Tableau 22 : Description des 11 surfaces de chaussée testées sur la piste de référence de l'Isttar à Bouguenais (France)

Surface	Type	Description	Aperçu	Année	PR	Sens
A	BBDr 0/6	Béton Bitumineux Drainant 0/6		2006	1750	Ouest-Est
A'	ES 8/10	Enduit Superficiel d'usure 8/10		1981	1655	Ouest-Est
E1	BBSG 0/10	Béton Bitumineux « traditionnel » Semi-grenu 0/10		2006	1595	Est-Ouest
E2	BBSG 0/10	Béton Bitumineux « traditionnel » Semi-grenu 0/10 Référence CPX française		1981	1850	Ouest-Est
F	Colgrip®	Enduit superficiel composé de gravillons artificiels (bauxite calcinée) 1,5/3 mm		2006	1750	Est-Ouest
G0	BBS 0/10	Béton Bitumineux Souple 0/10 semi grenu		2006	1808	Ouest-Est
ISO	BBSG 0/8	Béton Bitumineux Semi-grenu 0/8 répondant à la norme ISO 10844		2012	1970	Ouest-Est
L1	Résine lisse	Résine époxy lisse sans granulat		2006	1450	Est-Ouest
L2	SE 0/4	Sable Enrobé 0/4		1999	1595	Est-Ouest
M1	BBTM 0/10	Béton Bitumineux Très Mince 0/10 discontinu 2/6 (classe 1)		1988	1595	Est-Ouest
M2	BBTM 0/6	Béton Bitumineux Très Mince 0/6 discontinu 2/4 (classe 2)		2001	1970	Ouest-Est

4.1.1.2. Piste d'essais de la BAST à Geilenkirchen (Allemagne)

Une seconde campagne de mesure de texture 3D et de bruit a été réalisée en avril 2015 sur 6 planches d'essais de la piste de la BAST localisée sur la base aérienne de Geilenkirchen (Allemagne). Une vue aérienne de la piste (Figure 75) montre les deux zones mesurées : l'une constituée de revêtements ayant servi à la calibration du modèle statistique hybride SPERoN et l'autre comprenant des revêtements optimisés pour la réduction du bruit.



Figure 75 : Pistes d'essais de la BAST localisées sur la base aérienne de l'OTAN de Geilenkirchen en Allemagne

Un schéma d'ensemble de chaque zone est donné Figure 76, indiquant l'emplacement des 6 planches testées (noms en caractères gras) ainsi que le sens de circulation du véhicule au cours des essais (flèche). Les propriétés de chaque planche d'essai sont décrites dans le Tableau 23. Parmi les surfaces testées, 3 sont des surfaces fermées : LS1, LS2 et LS5. Les 3 autres surfaces sont annoncées comme poreuses, mais la mesure montre qu'elles sont en fait très peu absorbantes (cf. § 4.1.3).

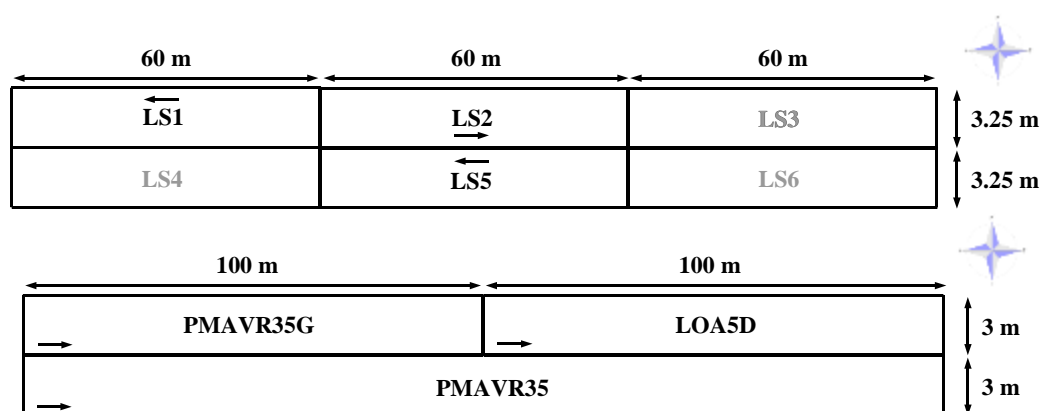


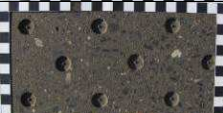

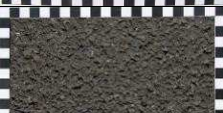



Figure 76 : Planches d'essais testées à Geilenkirchen dans la zone ayant servi à la calibration du modèle allemand SPERoN (en haut) et dans la zone avec des revêtements optimisés pour la réduction du bruit (en bas)

Tableau 23 : Description des 6 surfaces de chaussée testées sur la piste de la BASt à Geilenkirchen (Allemagne)

Surface	Type	Description	Aperçu	Sens
LOA	LOA5D	Couche de surface optimisée pour la réduction du bruit		Ouest-Est
LS1	SMA 0/8	Stone Mastic Asphalt 0/8		Est-Ouest
LS2	-	Béton de ciment poli avec des trous circulaires répartis périodiquement		Ouest-Est
LS5	-	Béton de ciment poli avec rainurage longitudinal		Est-Ouest
PMA	PMAVR35	Porous Mastic Asphalt		Ouest-Est
PMAG	PMAVR35G	Porous Mastic Asphalt avec particules de gomme additionnelles		Ouest-Est

4.1.2. Mesures de texture

Les mesures de texture ont été réalisées avec l'équipement développé au début du projet décrit au paragraphe 3.3.2.1. Toutes les planches ayant fait l'objet de mesures de bruit ont fait l'objet de mesures de texture 3D à l'exception des planches F et L1 de la piste de référence de l'Isttar à Bouguenais. La texture a donc été mesurée sur 15 planches.

Le protocole adopté est identique à celui choisi pour les planches de la tâche 2, soit la mesure de plusieurs relevés unitaires effectués dans la trace de roulement CPX et centrés sur le point de mesure de bruit au passage, avec une zone de recouvrement de 10 cm entre relevés adjacents. Le nombre de relevés unitaires mesurés pour chacune des planches ainsi que la taille des relevés complets reconstruits sont donnés dans le Tableau 24. Sur les 15 planches mesurées, 2 relevés unitaires ont été mesurés sur 7 d'entre elles, 3 relevés unitaires ont été mesurés sur l'une d'entre elles et 4 relevés unitaires ont été mesurés sur les 7 planches restantes.

Tableau 24 : Nombre de relevés de texture unitaires mesurés et taille (largeur et longueur) de la surface reconstruite

Surface	Nombre de relevés unitaires	Largeur [m]	Longueur [m]
A	4	0,30	5,79
A'	4	0,35	5,79
E1	4	0,35	5,82
E2	4	0,35	5,80
G0	2	0,35	2,95
ISO	4	0,35	5,79
L2	4	0,34	5,81
LOA	2	0,35	2,93
LS1	3	0,35	4,36
LS2	2	0,35	2,93
LS5	2	0,35	2,93
M1	2	0,34	2,94
M2	4	0,35	5,79
PMA	2	0,35	2,94
PMAG	2	0,35	2,93

Les Figures 77 et 78 regroupent des extraits de 10 cm par 20 cm des textures des planches mesurées sur la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais d'une part, sur le site de Geilenkirchen d'autre part. Elles donnent un aperçu de la taille des granulats et du type de rugosité de chaque planche.

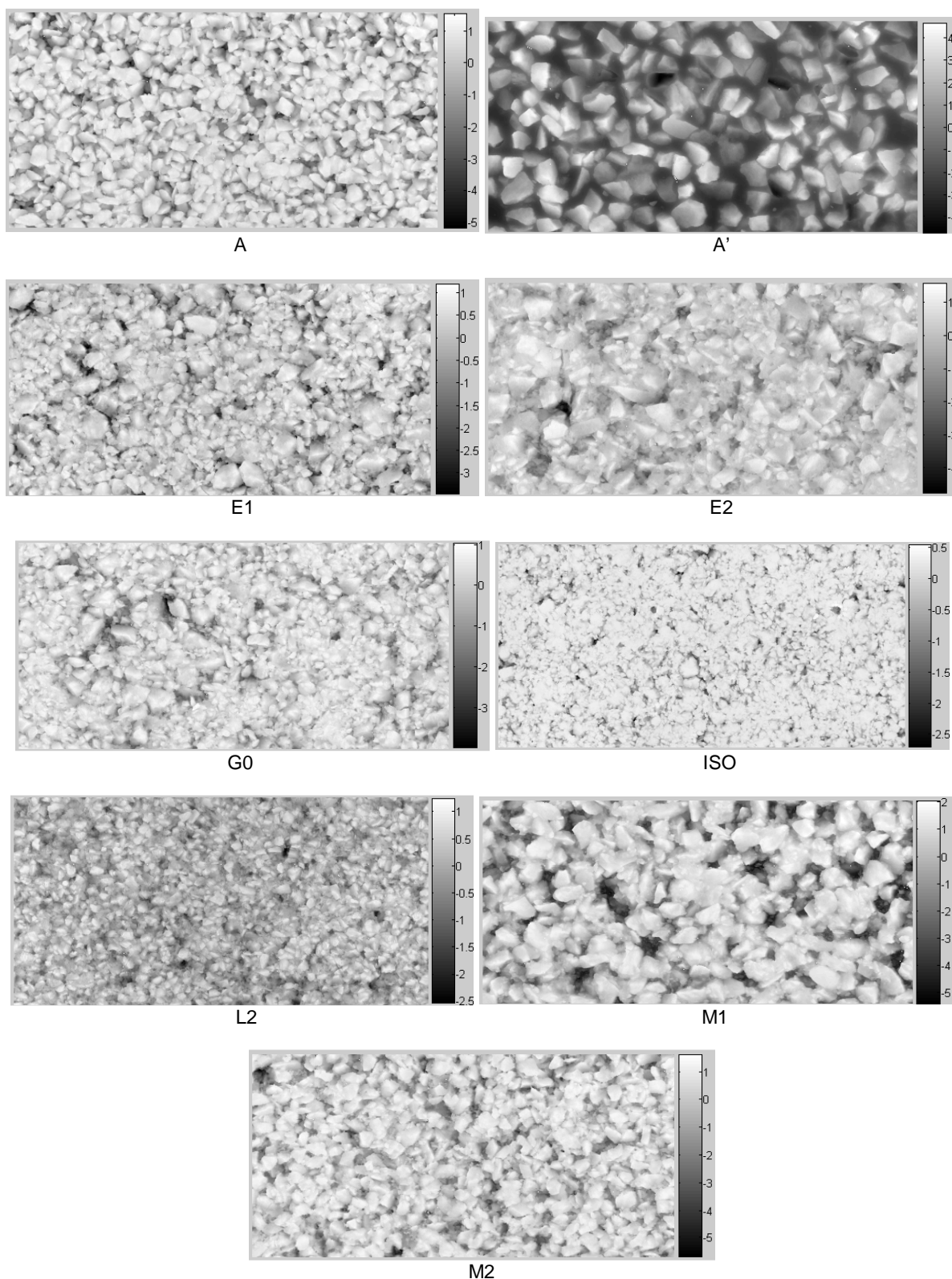


Figure 77 : Extraits des textures mesurées sur les planches de la piste de référence de l'Isttar à Bouguenais (10 cm x 20 cm) – L'échelle des niveaux de gris est donnée à droite de chaque extrait en mm

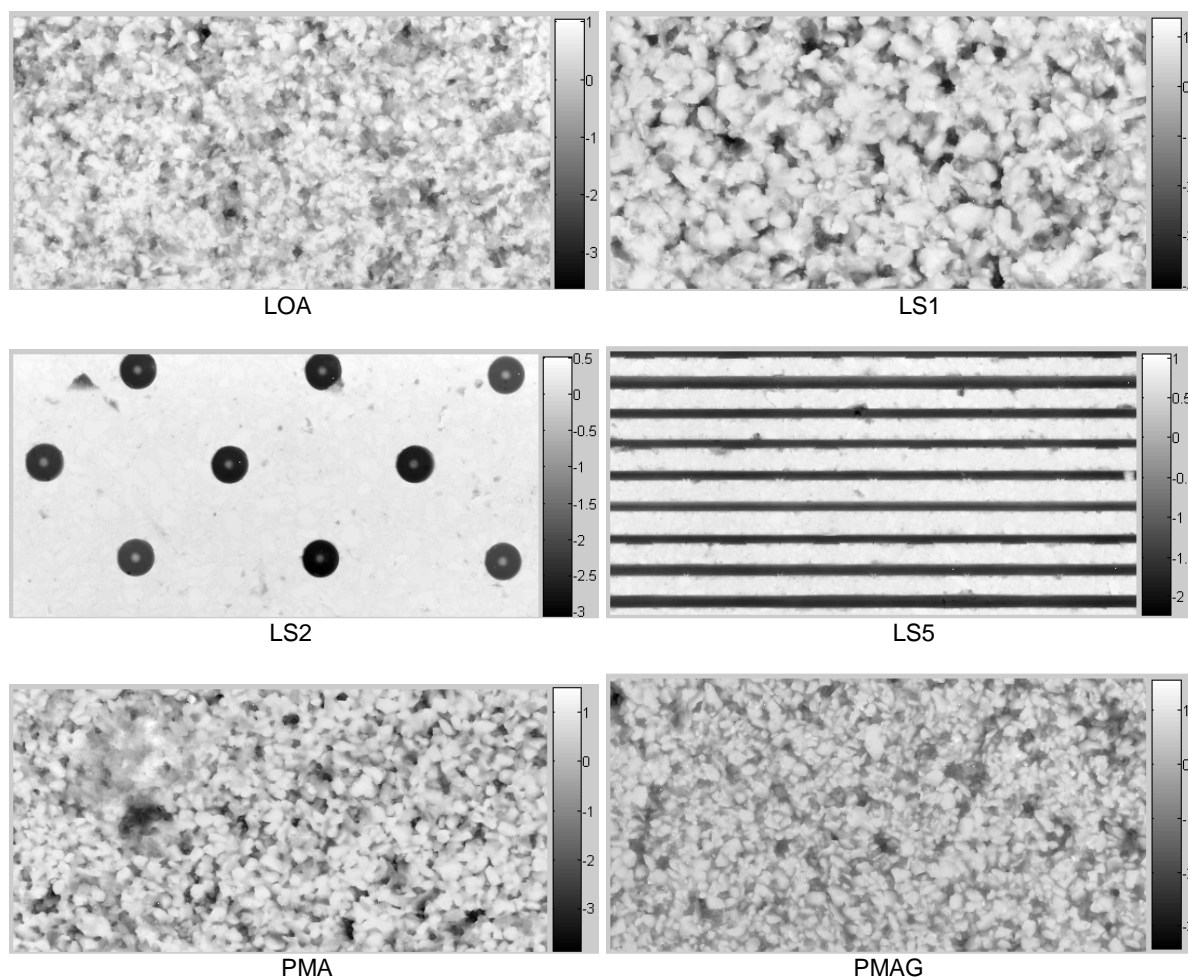


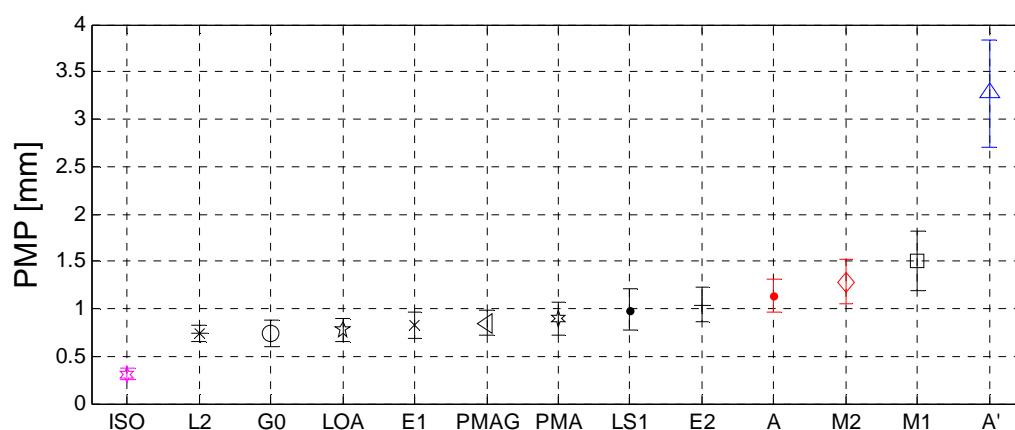
Figure 78 : Extraits des textures mesurées sur les planches du site de Geilenkirchen (10 cm x 20 cm) – L'échelle des niveaux de gris est donnée à droite de chaque extrait en mm

Les profondeurs moyennes de profils (PMP), densités de probabilité et moments statistiques associés ont été évalués sur l'ensemble de ces revêtements selon les méthodes décrites au paragraphe 3.3.2.2.

Les PMP ainsi que les moments statistiques sont donnés dans le Tableau 25. Les PMP des planches à texture aléatoires sont représentées par ordre croissant sur la Figure 79. Il faut noter concernant la planche LS5 (rainures longitudinales) que la valeur de PMP donnée dans le tableau (0,11 mm) n'est pas représentative de la profondeur de texture de cette planche, ayant été évaluée à partir de profils extraits sur la partie supérieure de la surface. La PMP la plus faible obtenue sur les planches conventionnelles à texture aléatoire est celle de la planche ISO qui s'élève à 0,31 mm. La plus élevée est celle de la planche A' (3,28 mm) qui est beaucoup plus élevée que celles des autres planches, la valeur de PMP immédiatement inférieure étant celle de la planche M1 qui est égale à 1,50 mm.

Tableau 25 : PMP, écart-types associés et moments statistiques évalués sur l'ensemble des planches

Surface	PMP [mm]	Ecart-type PMP [mm]	Rq [mm]	Rsk	Rku
A	1,13	0,17	0,95	-1,17	4,24
A'	3,28	0,57	1,76	0,44	2,48
E1	0,83	0,14	0,65	-1,43	5,97
E2	1,04	0,18	0,68	-1,00	5,35
G0	0,74	0,14	0,60	-1,32	5,16
ISO	0,31	0,06	0,35	-2,13	9,31
L2	0,73	0,09	0,46	-0,43	3,19
LOA	0,77	0,12	0,61	-0,94	3,65
LS1	0,99	0,21	0,87	-1,20	4,09
LS2	0,29	0,29	0,72	-3,48	13,68
LS5	0,11	0,06	1,03	-0,61	1,79
M1	1,50	0,31	1,29	-1,27	4,36
M2	1,29	0,23	1,07	-1,20	4,26
PMA	0,89	0,18	0,78	-1,27	4,55
PMAG	0,85	0,13	0,63	-0,79	3,16

**Figure 79** : Valeurs de PMP des planches à texture aléatoire classées par ordre croissant

Concernant la distribution des altitudes, les densités de probabilités évaluées sur les planches à texture aléatoires sont représentées sur la Figure 80 et sont à rapprocher des valeurs des moments statistiques données dans le Tableau 25. La plupart des planches présentent des textures légèrement négatives (E2, L2, LOA, PMAG) ou négatives (A, E1, G0, ISO, LS1, M1, M2, PMA). La planche A' se distingue à nouveau des autres planches par une texture positive marquée créée par les granulats clairement visibles sur la Figure 77.

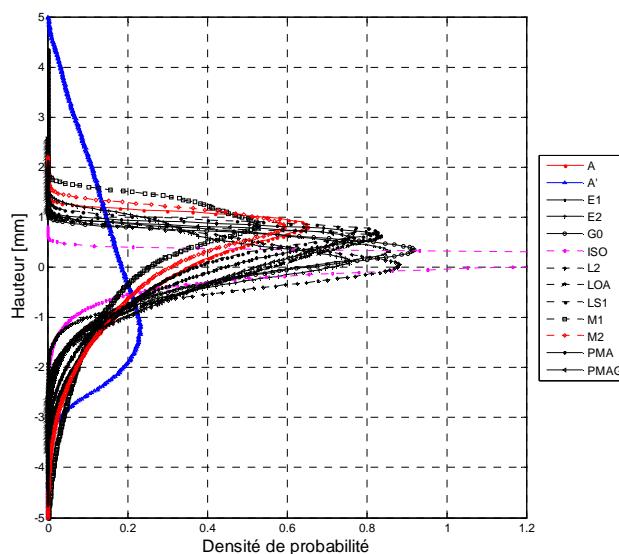


Figure 80 : Densité de probabilités des planches à texture aléatoire

Les spectres de texture par bandes de tiers d'octave ont également été évalués conformément à la méthode d'analyse décrite au paragraphe 3.3.2.2. Ces spectres de texture sont représentés sur la Figure 81, pour les planches à texture conventionnelle uniquement et pour les longueurs d'onde comprises entre 1 mm et 250 mm. On peut constater une gamme de niveaux très large, les niveaux les plus faibles étant ceux de la planche ISO sur toute la gamme de longueur d'onde considérée. On peut toutefois séparer la plage de longueur d'onde en deux domaines distincts. Pour les longueurs d'onde supérieures à 12,5 mm, la dynamique des niveaux est très importante pouvant s'élever jusqu'à 20 dB. La hiérarchie entre planches reste quasiment inchangée entre 250 mm et 12,5 mm. Les niveaux les plus élevés sont ceux de la planche A'. On constate un étalement assez progressif des niveaux des planches entre ceux des planches A' et ISO. Pour les longueurs d'onde inférieures à 8 mm, l'étendue des niveaux est moins importante et décroît d'environ 10 dB pour 8 mm à moins de 5 dB pour 1 mm. Dans cette gamme, la hiérarchie entre revêtements est différente de celle observée aux longueurs d'onde plus élevées. Les niveaux les plus élevés sont ceux de la planche A (BBDr 0/10) du fait des pics vers le bas assez étroits et d'amplitude assez importante qui sont dus à la porosité du matériau. On peut également constater que les niveaux du BBTM 0/6 (planche M2) sont presque voire aussi élevés que ceux de la planche A pour la même raison. La planche A' présente quant à elle des niveaux de moins en moins élevés relativement aux autres planches au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue.

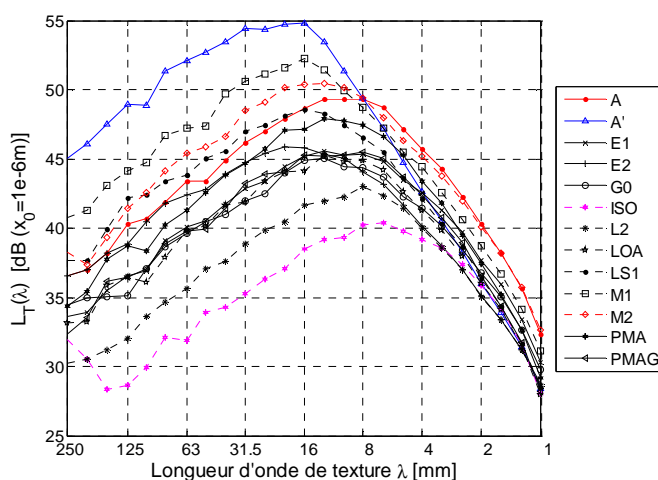


Figure 81 : Spectres de texture par bandes de tiers d'octave des planches à texture aléatoire

4.1.3. Mesures d'absorption acoustique

Les mesures d'absorption ont été réalisées suivant la norme ISO 13472-1 [15] et en suivant la procédure de mesure et la méthode d'analyse des données décrites dans la partie 3.3.3. Les planches A et M2 de la piste de référence de l'Ifsttar ont été testées en avril 2013 ainsi que la planche ISO servant de surface de référence pour la correction des mesures conformément à la norme. Sur le site de Geilenkirchen, les planches LOA, PMA et PMAG ont été testées en avril 2015. Au cours des essais, la température moyenne de l'air à 1,2 m de la surface du sol était de 16,1°C à Bouguenais et de 23,0°C à Geilenkirchen. La vitesse du vent n'a pas excédé 3,5 m/s au cours des essais.

Le coefficient d'absorption acoustique moyen α par bande de tiers d'octave est donné Figure 82 pour les surfaces A, LOA, M2, PMA et PMAG. Ces résultats tiennent compte de la correction à partir de la surface de référence ISO. Le revêtement A (BBDr 0/6) présente un pic d'absorption de l'ordre de 0,8 entre 1250 Hz et 1600 Hz, tandis que le revêtement M2 (BBTM 0/6) présente un pic d'absorption de l'ordre de 0,4 entre 800 Hz et 1 000 Hz. Ces résultats sont très proches de ceux déjà mesurés sur ces surfaces en 2006 lors du précédent projet Deufrako P2RN [1]. Les revêtements LOA, PMA et PMAG ont un coefficient d'absorption acoustique très faible, de l'ordre de 0,1 ou 0,2, sur une large gamme de fréquences comprise entre 315 Hz et 2000 Hz. Ils sont donc très peu absorbants et seront qualifiés de revêtements fermés par la suite.

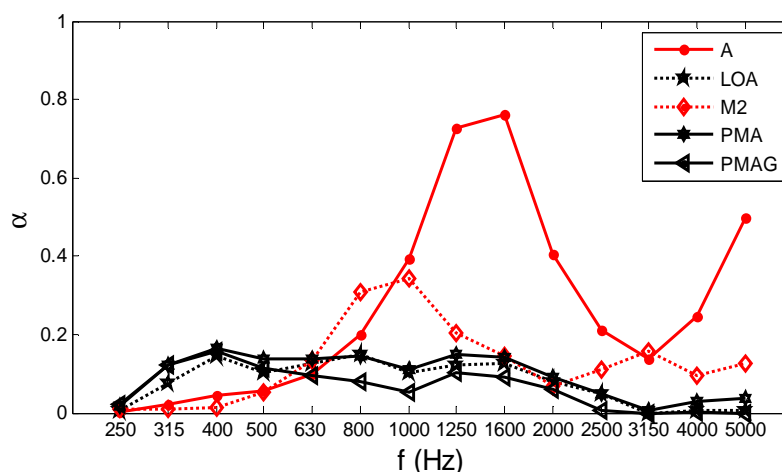


Figure 82 : Coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave mesuré sur les planches A (BBDr 0/6), LOA, M2 (BBTM 0/6), PMA et PMAG

La Figure 83 donne le coefficient d'absorption moyen en bande fine mesuré sur chaque surface ainsi que la courbe d'absorption théorique du modèle prédictif [16]. Les paramètres physiques du modèle Ω , R_s et q^2 sont donnés dans le Tableau 26. Ils ont été ajustés manuellement de façon à avoir la meilleure concordance entre la mesure et la théorie sur le premier pic d'absorption. L'épaisseur l a été fixée à partir des données de construction de la planche d'essai. Ces paramètres pourront être utilisés à l'avenir pour tenir compte de l'absorption dans les modèles de rayonnement du bruit de contact pneumatique/chaussée.

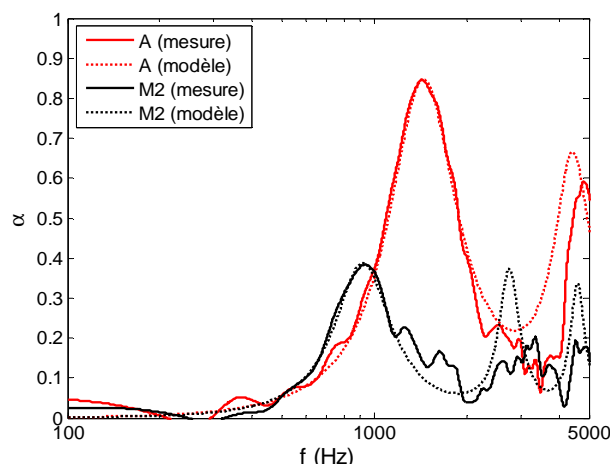


Figure 83 : Coefficient d'absorption en bande fine mesuré sur les planches A (BBDr 0/6) et M2 (BBTMO/6) et recalé sur le modèle prédictif [16]

Tableau 26 : Paramètres du modèle d'absorption [16] recalés à partir des courbes expérimentales

Surface	l (m)	Ω	R_s (Nm ⁻⁴ s)	q^2
A	0,040	0,16	42000	1,6
M2	0,025	0,12	270000	10,0

4.1.4. Mesures de bruit de roulement

Les équipements et la procédure de mesure du bruit de roulement sur les pistes d'essais sont les mêmes que sur les planches d'essais *in situ* (cf. § 3.3.4.1). Le véhicule est un Renault Scénic essence 2 litres exclusivement dédié à la mesure en continu du bruit de roulement (méthode CPX). La masse totale du véhicule est d'environ 1540 kg. La charge sur la roue arrière droite servant pour la mesure CPX est d'environ 3300 N. Deux types de pneumatiques ont été testés :

- des pneumatiques standards à motifs, Michelin Energy E3A de dimensions 195/60 R15 ;
- des pneumatiques de compétition lisses, Avon 16" radial slick de dimensions 210/60 R16.

La pression de gonflage des deux types de pneumatiques était de 2,2 bars durant les essais. La dureté (shore A) pour les quatre pneumatiques à motifs est de 72,0 et pour les pneumatiques lisses elle est de 54,0 à l'arrière et de 70,5 à l'avant.

Les mesures de bruit en continu (méthode CPX) et au passage (méthode CB) ont été réalisées simultanément sur une distance de 20 mètres de long centrée autour du Point de Référence (PR) de la planche d'essais. Sur chaque planche d'essais plusieurs passages ont été effectués à différentes vitesses de consigne :

- de 65 km/h à 110 km/h par pas de 5 km/h sur les planches de la piste de l'Ifsttar à Bouguenais ;
- de 50 km/h à 110 km/h par pas de 5 km/h sur les planches de la piste de la BAST à Geilenkirchen ;

La vitesse réelle du véhicule à chaque passage est mesurée avec précision par le système de mesure CPX. La Figure 84 donne deux exemples de mesures CPX et CB simultanées, l'un sur la piste de l'Ifsttar à Bouguenais et l'autre sur la piste de Geilenkirchen. Le panneau de déclenchement de la mesure CPX est visible sur la figure et est systématiquement positionné à 22 m en amont du PR. Le microphone de la mesure au passage est positionné à 7,5 m de l'axe de circulation du véhicule et à 1,2 m de la surface du sol.

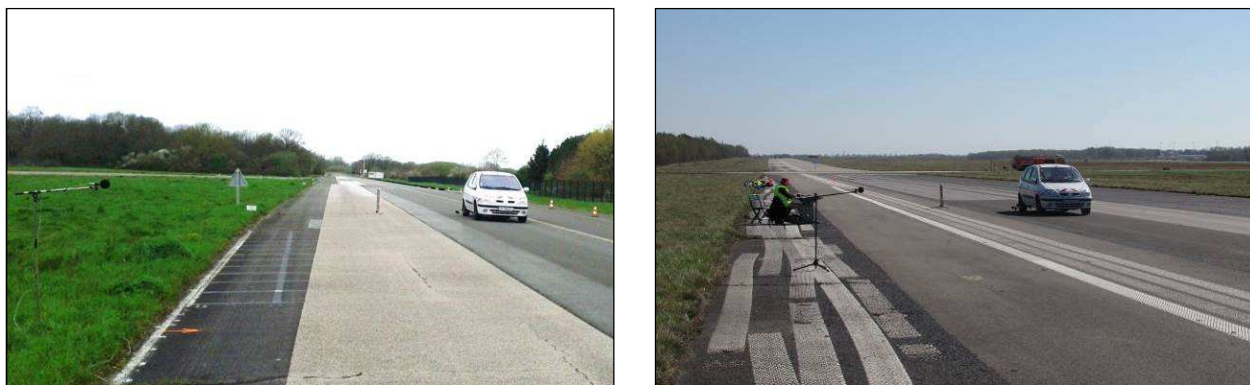


Figure 84 : Exemples de mesures CPX et CB simultanées sur la planche M2 (à gauche) de la piste de référence de l'Isttar à Bouguenais et sur la planche LS1 (à droite) de la piste d'essais de la BAST à Geilenkirchen

Dans la suite, les résultats de mesure sont présentés d'abord pour le pneumatique à motifs puis pour le pneumatique lisse. Dans une dernière partie, les deux types de pneumatiques sont ensuite comparés et les résultats sont discutés. La méthode d'analyse des mesures de bruit est identique à celle présentée au § 3.3.4.2. L'évolution des niveaux de bruit global et en 1/3 d'octave en fonction du logarithme de la vitesse sont estimés par régression statistique sur les données mesurées. Les spectres sont limités entre 400 Hz et 4000 Hz pour la mesure CPX et le niveau de bruit global CPX est recomposé sur cette gamme de fréquence. La vitesse de référence choisie est de 90 km/h. La température de l'air à 1,2 m du sol sera également indiquée. Étant donné la gamme de températures resserrée, les niveaux de bruit seront donnés à la température d'essai (aucune correction en température n'est apportée). Enfin, les spectres seront présentés en dBA (et non en dB comme au § 3.3.4.3).

4.1.4.1. Résultats pour le pneumatique à motifs Michelin Energy E3A 195/60 R15

Niveaux de bruit global pour le pneumatique à motifs

Le Tableau 27 donne les niveaux de bruit global CPX recomposés ainsi que les niveaux de bruit global CB pour le pneumatique à motifs à la vitesse de référence de 90 km/h pour les 17 planches d'essais. Les pentes des régressions statistiques sont également données pour la mesure en continu et pour la mesure au passage. Les incertitudes indiquées correspondent à l'intervalle de confiance à 95 % de la régression statistique utilisée pour l'analyse des mesures de bruit. Il apparaît que les niveaux de bruit mesurés au passage sont inférieurs d'environ 20 dBA aux niveaux de bruit mesurés en continu à proximité du contact pneumatique/chaussée. De plus, les pentes des régressions logarithmiques sont du même ordre de grandeur pour les deux types de mesure.

Tableau 27 : Niveaux de bruit global CPX et CB à 90 km/h pour le pneumatique à motifs

Surface	T _{air} (°C)	L _{rAeq} (90) (dBA)	b _{LrAeq} (dBA/dec)	L _{Amax} (90) (dBA)	b _{LAmax} (dBA/dec)
A	16,6	96,0±1,1	19,2±1,3	73,7±0,8	19,9±3,3
A'	18,1	103,0±1,1	36,6±1,3	83,3±0,9	35,7±3,8
E1	18,5	96,5±0,8	32,2±1,0	74,9±0,8	31,1±3,3
E2	15,7	99,4±0,9	33,7±1,0	78,0±1,0	32,0±4,0
F	17,6	98,4±0,9	34,2±1,0	78,0±0,8	35,9±3,6
G0	15,6	97,4±0,7	29,4±0,9	76,0±0,5	30,0±2,0
ISO	16,8	98,9±1,0	33,1±1,1	75,9±1,3	31,1±5,1
L1	19,1	101,4±1,3	39,6±1,7	78,6±1,1	36,8±4,5
L2	18,0	97,2±1,0	30,4±1,1	75,5±1,0	33,6±4,3
LOA	20,5	97,7±0,9	32,6±0,7	75,8±1,0	31,6±2,7
LS1	21,5	99,4±0,9	33,3±0,6	79,0±0,5	33,9±1,3
LS2	21,0	101,7±1,2	39,6±0,9	79,6±0,9	38,5±2,3
LS5	19,0	99,5±1,1	36,4±0,7	78,3±0,7	34,0±1,7
M1	17,2	99,1±1,0	31,2±1,2	78,2±0,7	32,7±3,0
M2	14,7	96,0±1,0	23,0±1,2	73,0±0,9	22,4±4,0
PMA	19,0	99,4±1,0	32,6±0,8	77,6±1,2	33,8±3,0
PMAG	18,0	98,8±1,1	32,7±0,8	77,3±0,5	32,5±1,4

Les niveaux de bruit obtenus permettent d'établir une classification acoustique des revêtements testés, donnée Figure 85. Les revêtements sont également classés par valeur de pente croissante sur la Figure 86. Un symbole est attribué à chaque planche d'essai. Les couleurs sont liées à la forme des spectres qui sera analysée plus loin. Les deux types de mesure donnent un classement assez proche des revêtements. Les niveaux de bruit CPX varient entre 96,0 dBA (revêtement A) et 103,0 dBA (revêtement A'), soit une différence de 7 dBA entre le revêtement le moins bruyant et le plus bruyant. Cette différence est de l'ordre de 10 dBA pour la mesure au passage : les niveaux de bruit CB varient entre 73,0 dBA (revêtement M2) et 83,3 dBA (revêtement A'). La valeur des pentes de la régression statistique varie entre 19,2 dBA/dec (revêtement A) et 39,6 dBA/dec (revêtement LS2) pour les mesures CPX et entre 19,9 dBA/dec (revêtement A) et 38,5 dBA/dec (revêtement LS2) pour les mesures au passage.

Les niveaux de bruit et les pentes ne donnent pas exactement les mêmes classifications. Toutefois, certaines tendances peuvent être observées. Les surfaces poreuses (A et M2) sont les surfaces les plus silencieuses et ont également les pentes les plus faibles de l'ordre de 20 dBA/dec. Les revêtements fermés classiques en béton bitumineux (E1, E2, G0, L2, LOA, LS1, M1, PMA, PMAG) ont des niveaux de bruit intermédiaires couvrant une gamme d'environ 4 dBA et dont la pente est comprise entre 30 dBA/dec et 35 dBA/dec. Les surfaces lisses ou quasi-lisses (ISO, L1, LS2, LS5) sont bruyantes et couvrent une gamme d'environ 3 dBA pour une pente comprise entre 30 dBA/dec et 40 dBA/dec. Les enduits superficiels

(A' et F), bruyants également, couvrent une gamme de 5 dBA et la pente pour ces surfaces est proche de 35 dBA/dec.

La Figure 87 donne la corrélation statistique entre les données mesurées en continu et celles mesurées au passage. Aussi bien pour les niveaux de bruit que pour les pentes, le coefficient de corrélation est de 0,94 et la pente de la régression statistique est proche de 1, ce qui montre un très bon accord entre les mesures CPX et les mesures en bord de voie.

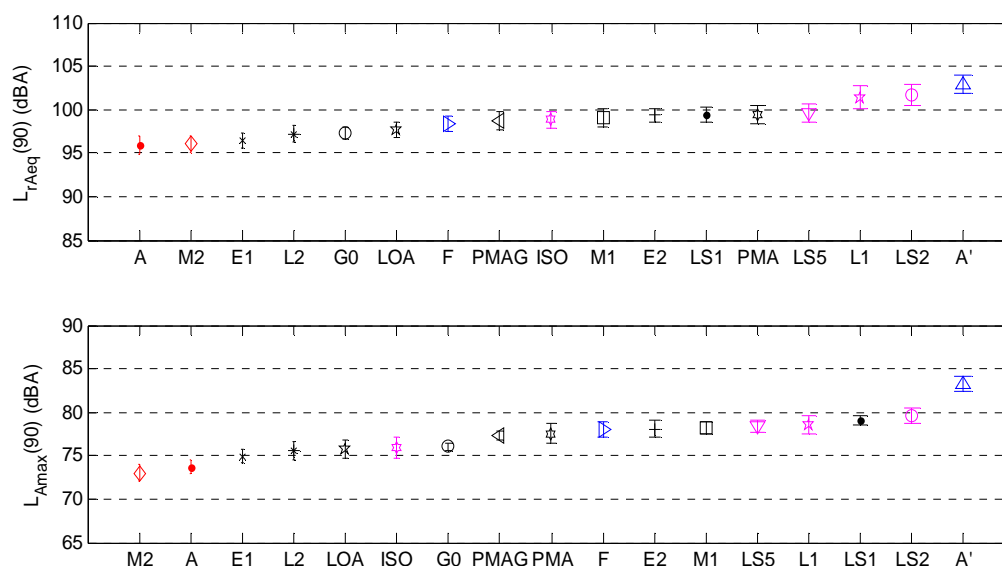


Figure 85 : Classification acoustique des différentes surfaces à la vitesse de référence de 90 km/h à partir des mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs

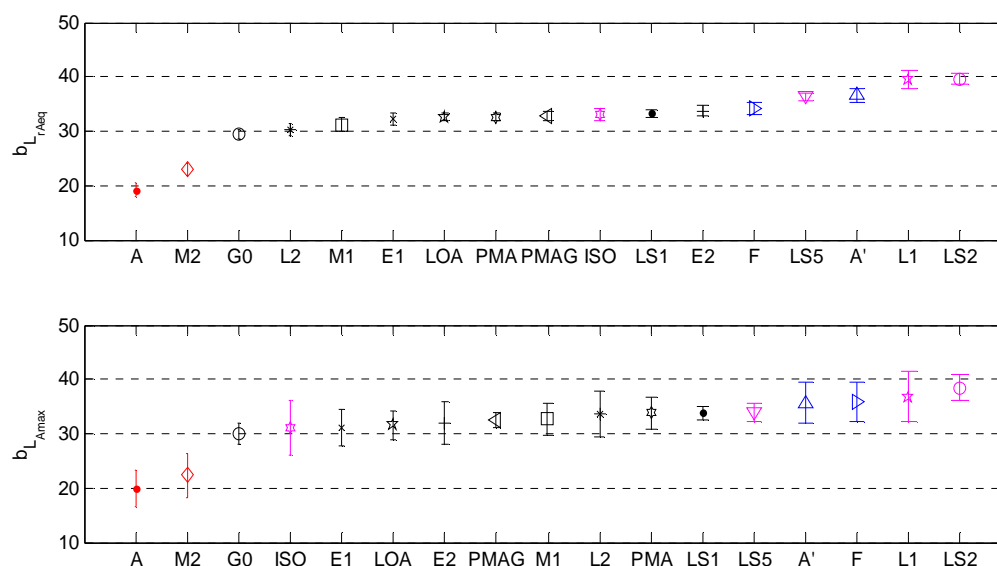


Figure 86 : Représentation par ordre croissant de la pente de régression des différentes surfaces obtenue pour les mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs

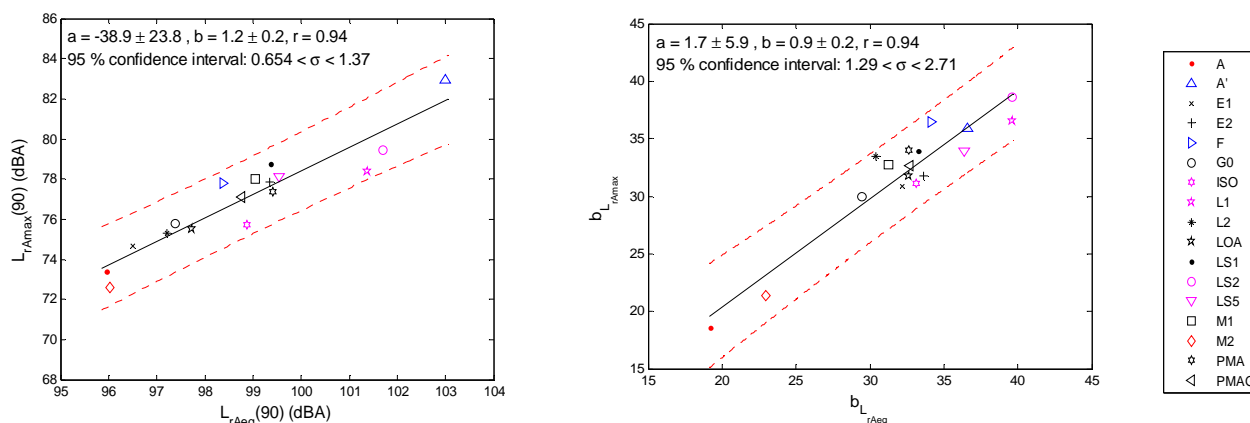


Figure 87 : Corrélation entre niveaux de bruit mesurés au passage et en continu (à gauche) et entre les pentes mesurées au passage et en continu (à droite). Statistique incluant les 17 revêtements testés avec le pneumatique à motifs

Spectres pour le pneumatique à motifs

Les spectres de bruit mesurés au passage sont qualitativement représentés sur la Figure 88 pour les 17 surfaces testées dans le cas du pneumatique à motifs roulant à 90 km/h. Les surfaces sont présentées par ordre croissant des niveaux de bruit global mesurés au passage. Un pic à 1000 Hz est clairement identifié pour la plupart des surfaces. Le pic est décalé à 800 Hz pour les surfaces M2 et A ayant des propriétés d'absorption. En raison de la pondération A qui atténue fortement les spectres à basses fréquences (entre 100 Hz et 315 Hz), la plus grande partie de l'énergie acoustique est contenue entre 400 Hz et 2000 Hz, sauf pour les surfaces lisses L1 et LS2 qui contiennent de l'énergie jusqu'à 5000 Hz.

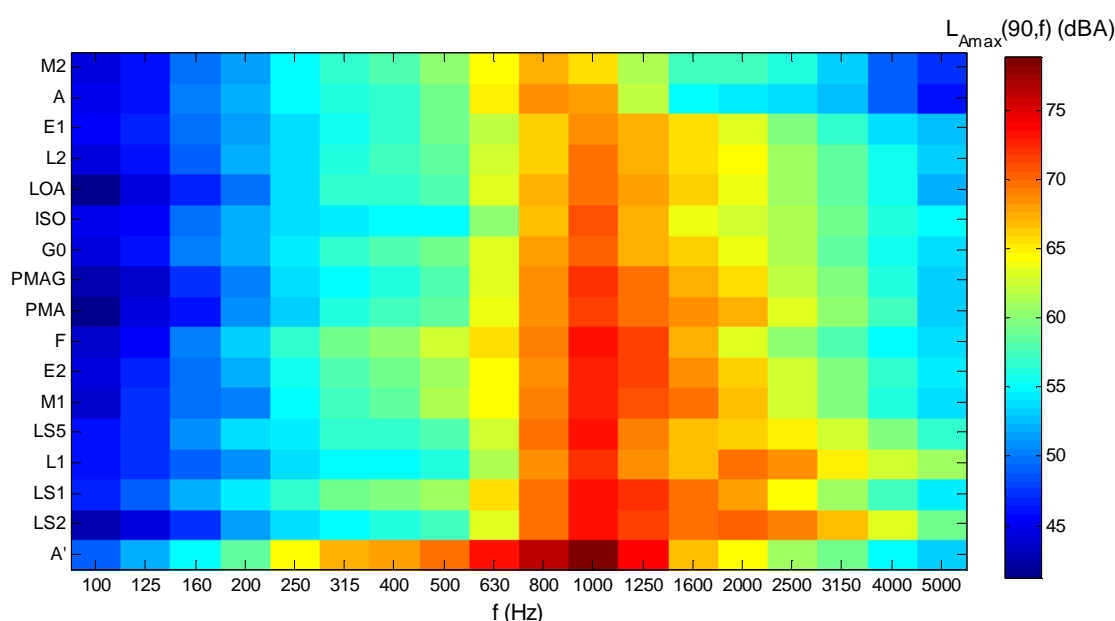


Figure 88 : Représentation qualitative des niveaux de bruit en tiers d'octave mesurés au passage à 90 km/h pour l'ensemble des surfaces testées dans le cas du pneumatique à motifs

La Figure 89 compare les spectres mesurés entre 400 Hz et 4000 Hz par la méthode de mesure en continu (en haut) et par la méthode de mesure au passage (en bas) pour l'ensemble de surfaces testées. La forme des spectres des deux méthodes de mesure est très proche pour la plupart des surfaces. Différentes formes de spectres sont observées. Elles sont mises en évidence par différentes couleurs correspondant au type de revêtement testé. Les surfaces absorbantes (A et M2) sont représentées en rouge, les revêtements bitumineux fermés (E1, E2, G0, L2, LOA, LS1, M1, PMA et PMAG) sont indiqués en noir, les surfaces lisses ou presque lisses (ISO, L1, LS2 et LS5) sont tracées en magenta et les enduits superficiels (A' et F) sont

représentés en bleu. Les observations de la Figure 88 sont confirmées de façon plus qualitative et seront discutées par la suite au § 4.1.4.3.

La corrélation entre les spectres de bruit mesurés par la méthode en continu et ceux mesurés par la méthode au passage est étudiée Figure 90. Le graphe inclut toutes les surfaces testées et chaque point représente le niveau de bruit à une fréquence donnée comprise entre 400 Hz et 4000 Hz. La corrélation entre valeurs spectrales CPX et CB est quasi-parfaite : le coefficient de corrélation est de 0,98 et la pente de la régression est de 1,0. L'ordonnée à l'origine permet alors d'estimer la différence moyenne entre spectres mesurés par la méthode en continu et ceux mesurés par la méthode au passage. On obtient une diminution moyenne de $-21,3 \pm 2,6$ dBA. En complément, la Figure 91 donne pour chaque surface le niveau de bruit par tiers d'octave mesuré au passage en fonction du niveau de bruit par tiers d'octave mesuré en continu. Le graphe inclut toutes les fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz. Pour toutes les surfaces, la corrélation entre spectres CB et spectres CPX est excellente : le coefficient de corrélation et la pente de la régression sont tous les deux très proches de 1. Pour chaque surface, la diminution du niveau de bruit de roulement en bord de voie par rapport au niveau de bruit CPX peut être estimée de façon de plus précise. Selon les surfaces, elle varie entre 14,0 dBA et 28,6 dBA.

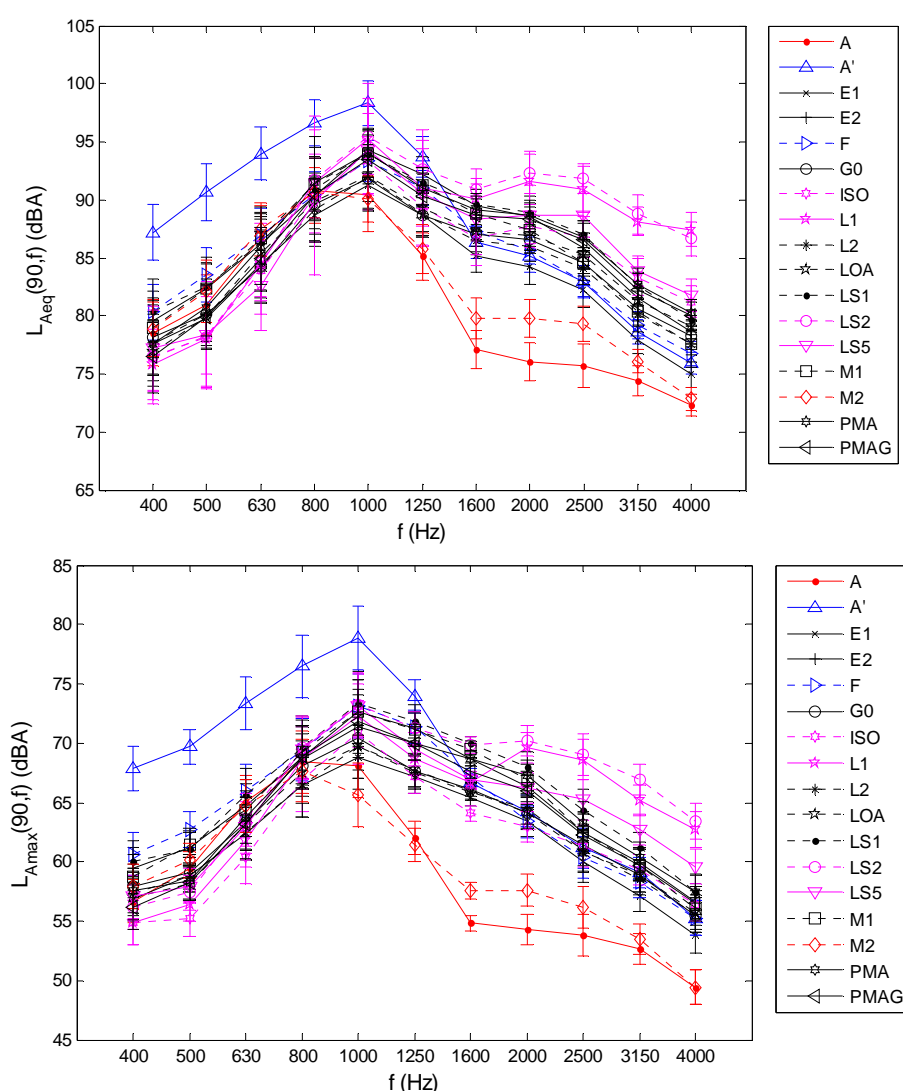


Figure 89 : Comparaison des spectres de bruit mesurés en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h

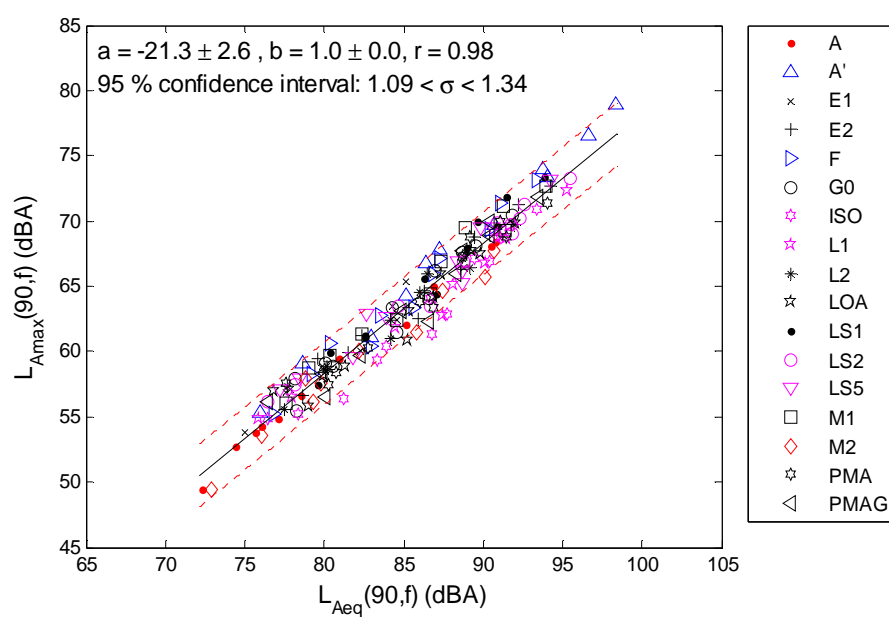


Figure 90 : Corrélation entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h

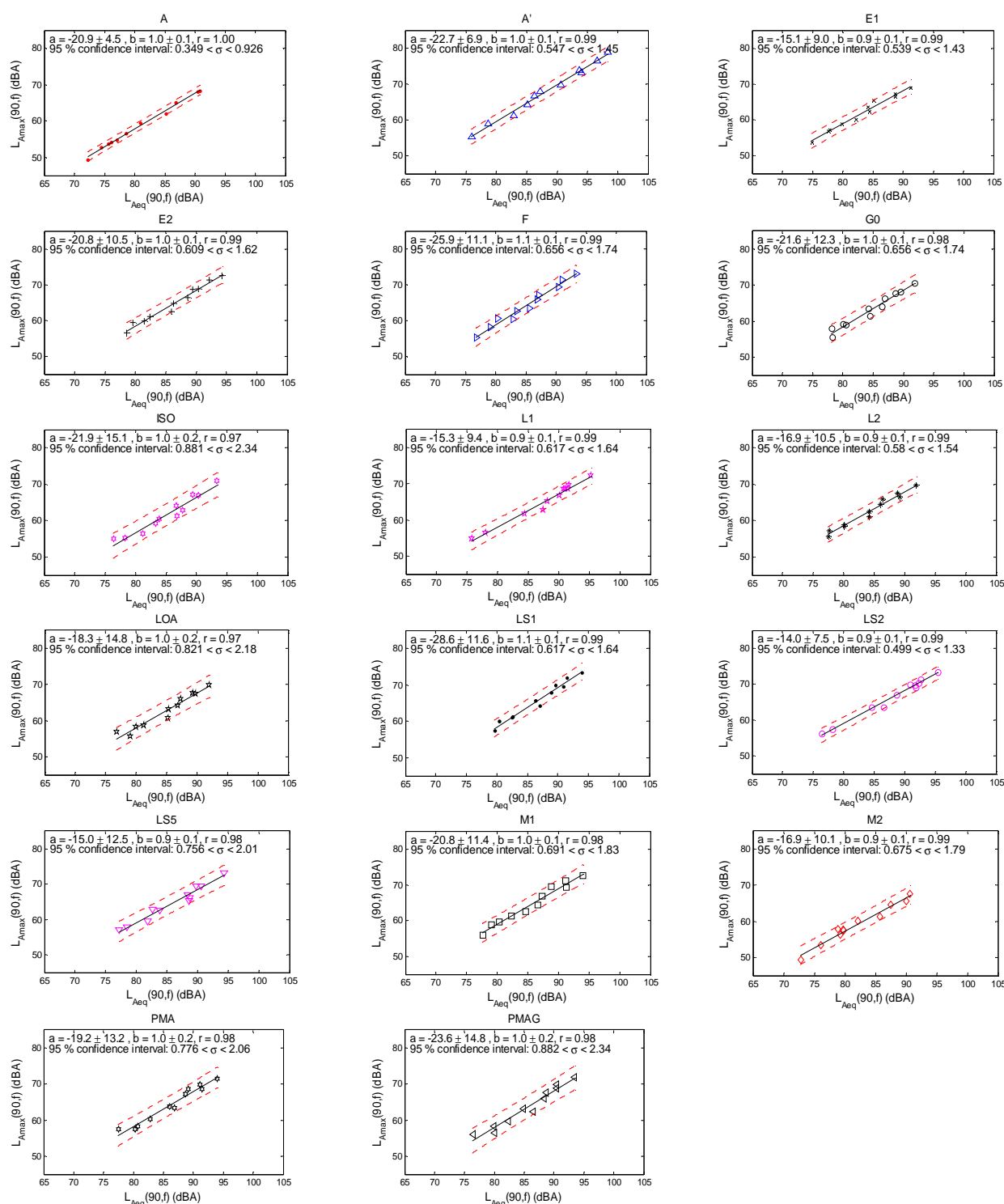


Figure 91 : Corrélation, surface par surface, entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h

4.1.4.2. Résultats pour le pneumatique lisse Avon radial slick 210/60 R16

Niveaux de bruit global pour le pneumatique lisse

Le Tableau 28 donne les niveaux de bruit global CPX recomposés ainsi que les niveaux de bruit global CB pour le pneumatique lisse à la vitesse de référence de 90 km/h pour les 17 planches d'essais. Les pentes des régressions statistiques sont également données pour la mesure en continu et pour la mesure au passage. Les incertitudes indiquées correspondent à l'intervalle de confiance à 95 % de la régression statistique utilisée pour l'analyse des mesures de bruit. Comme pour le pneumatique à motifs, il apparaît que les niveaux de bruit mesurés au passage sont inférieurs d'environ 20 dBA aux niveaux de bruit mesurés en continu à proximité du contact pneumatique/chaussée. De plus, pour la plupart des revêtements, les pentes des régressions logarithmiques sont du même ordre de grandeur pour les deux types de mesures.

Tableau 28 : Niveaux de bruit global CPX et CB à 90 km/h pour le pneumatique lisse

Surface	T _{air} (°C)	L _{rAeq} (90) (dBA)	b _{LrAeq} (dBA/dec)	L _{Amax} (90) (dBA)	b _{LAmax} (dBA/dec)
A	18,5	91,4±1,2	21,3±1,5	70,7±1,4	29,3±6,1
A'	21,6	105,4±1,1	28,6±1,4	85,4±0,7	29,6±3,2
E1	21,8	93,8±0,9	32,2±1,1	74,4±0,9	32,9±3,8
E2	17,8	99,6±0,9	26,6±1,1	79,2±1,1	26,9±4,6
F	18,4	98,7±0,7	30,0±0,8	79,1±0,5	33,1±1,9
G0	17,8	95,2±1,1	28,1±1,3	75,6±0,9	28,2±3,7
ISO	15,2	93,5±1,4	20,7±1,7	71,5±1,4	22,2±5,9
L1	20,0	92,4±0,6	35,9±0,7	72,0±1,2	39,5±5,2
L2	20,8	94,5±1,2	29,1±1,4	75,1±1,1	31,8±4,5
LOA	22,0	95,0±0,8	32,1±0,6	74,7±1,2	31,6±3,0
LS1	24,5	97,6±0,6	36,0±0,4	78,2±0,9	32,1±2,2
LS2	24,5	105,9±2,9	36,5±2,2	86,5±4,0	39,6±10,1
LS5	23,5	93,5±0,8	29,5±0,5	74,3±1,2	34,4±2,8
M1	19,9	98,5±0,7	31,7±0,8	78,7±0,8	31,3±2,9
M2	15,5	94,0±1,5	24,2±3,0	71,2±1,0	24,9±6,5
PMA	22,0	96,5±1,0	30,2±0,8	77,1±1,4	31,3±3,6
PMAG	22,5	95,9±1,2	31,4±0,9	76,8±1,2	30,2±3,0

Les niveaux de bruit obtenus permettent d'établir une classification acoustique des revêtements testés, donnée Figure 92. Les revêtements sont également classés par valeur de pente croissante sur la Figure 93.

Les deux types de mesure donnent un classement assez proche des revêtements. Les niveaux de bruit CPX varient entre 91,4 dBA (revêtement A) et 105,9 dBA (revêtement LS2), soit une différence de 14,5 dBA entre le revêtement le moins bruyant et le plus bruyant. Cette différence est de l'ordre de 15,8 dBA pour la mesure au passage : les niveaux de bruit CB varient entre 70,7 dBA (revêtement A) et 86,5 dBA (revêtement LS2). La valeur des pentes de la régression statistique varie entre 20,7 dBA/dec (revêtement ISO) et 36,5 dBA/dec (revêtement LS2) pour les mesures CPX et entre 22,2 dBA/dec (revêtement ISO) et 39,6 dBA/dec (revêtement LS2) pour les mesures au passage.

Les niveaux de bruit et les pentes ne donnent pas exactement les mêmes classifications. Les surfaces poreuses (A et M2) sont les surfaces les plus silencieuses pour la mesure au passage et ont des pentes comprises entre 20 et 30 dBA/dec. Pour la mesure en continu, A est le revêtement le moins bruyant mais M2 est 3,6 dBA plus bruyant. Contrairement au pneumatique à motifs, les surfaces quasi-lisse (ISO, L1 et LS5) sont parmi les moins bruyantes tandis que la surface LS2 avec des trous périodiques est la surface la plus bruyante. La surface ISO a la pente la plus faible de l'ordre de 20 dBA/dec, la surface lisse rainurée longitudinalement LS5 a une pente comprise entre 30 et 35 dBA/dec alors que les surfaces L1 et LS2 ont des pentes proches de 40 dBA/dec. Les revêtements fermés classiques en béton bitumineux (E1, E2, G0, L2, LOA, LS1, M1, PMA, PMAG) ont des niveaux de bruit intermédiaires couvrant une gamme d'environ 5 dBA et dont la pente est comprise entre 25 dBA/dec et 35 dBA/dec. Les enduits superficiels (A' et F) sont parmi les plus bruyants. Ils couvrent une gamme de 6,5 dBA et la pente pour ces surfaces est de proche de 30 dBA/dec.

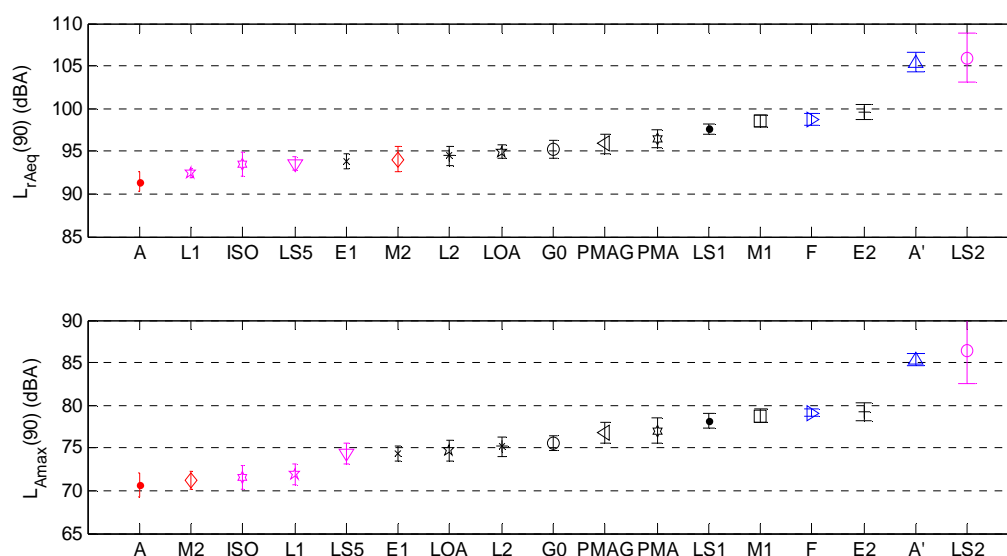


Figure 92 : Classification acoustique des différentes surfaces à la vitesse de référence de 90 km/h à partir des mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse

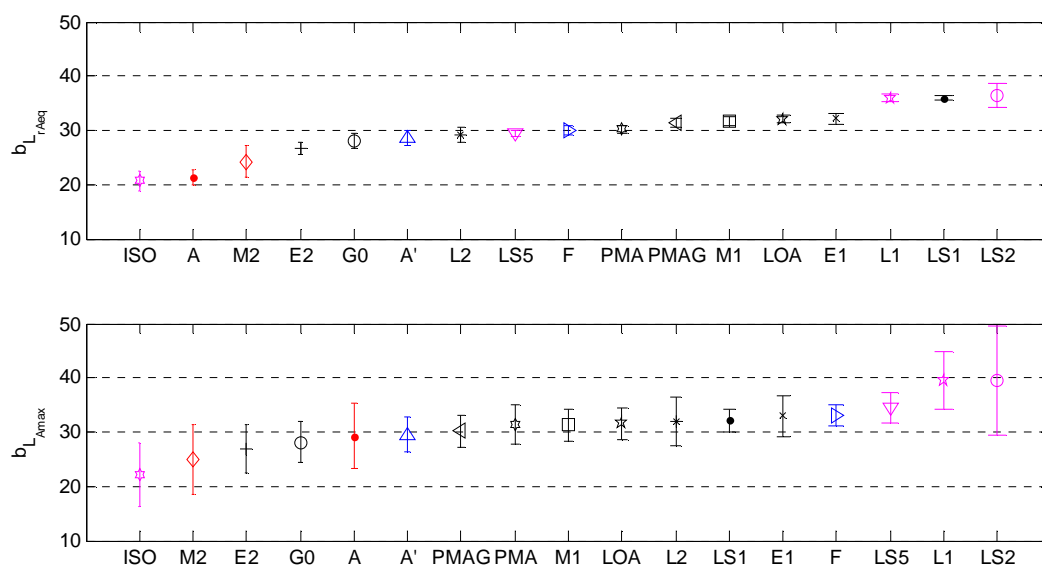


Figure 93 : Représentation par ordre croissant de la pente de régression des différentes surfaces obtenue pour les mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse

La Figure 94 donne la corrélation statistique entre les données mesurées en continu et celles mesurées au passage. Pour les niveaux de bruit, le coefficient de corrélation est de 0,97 et la pente de la régression statistique est proche de 1, ce qui montre un très bon accord entre les mesures CPX et les mesures en bord de voie. Pour les pentes, l'accord est également bon : coefficient de corrélation de 0,85 et pente proche de 1,0.

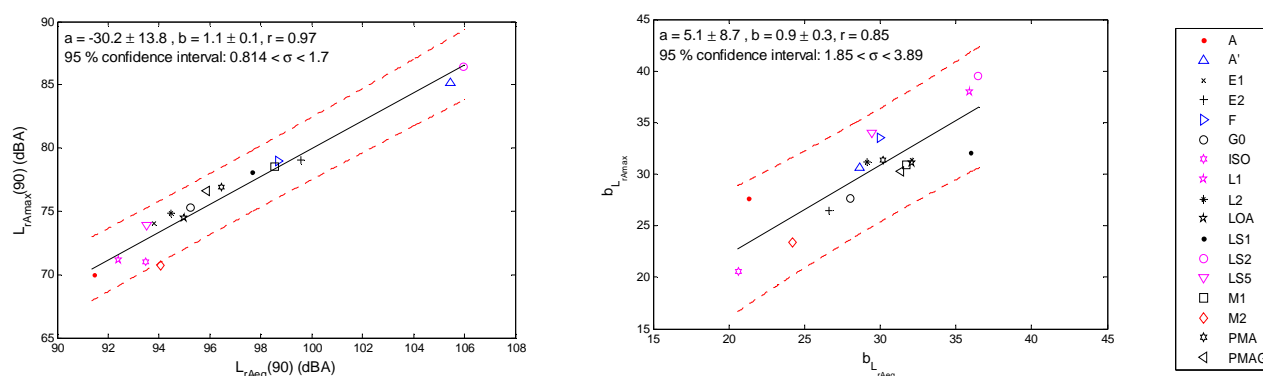


Figure 94 : Corrélation entre niveaux de bruit mesurés au passage et en continu (à gauche) et entre les pentes mesurées au passage et en continu (à droite). Statistique incluant les 17 revêtements testés avec le pneumatique lisse

Spectres pour le pneumatique lisse

Les spectres de bruit mesurés au passage sont qualitativement représentés sur la Figure 95 pour les 17 surfaces testées dans le cas du pneumatique lisse roulant à 90 km/h. Les surfaces sont présentées par ordre croissant des niveaux de bruit global mesurés au passage. Comme pour le pneumatique à motifs, l'énergie acoustique est comprise entre 400 Hz et 1250 Hz pour les surfaces poreuses A et M2 avec un pic à 800 Hz. La surface lisse L1, parmi les plus silencieuses, a un spectre quasiment plat et la surface LS5 rainurée longitudinalement, également silencieuse, a un premier pic à 1250 Hz et un second pic à 2500 Hz. Pour la plupart des autres surfaces fermées, l'énergie acoustique est comprise sur une large gamme de fréquences comprise entre 500 Hz et 3150 Hz, avec un pic à 2000 Hz. Les surfaces A' et LS2, très bruyantes, font exception. La surface A' a un spectre avec un pic à 1000 Hz très proche de celui obtenu pour le pneumatique à motifs. La surface LS2 composée de trous répartis périodiquement a un pic très marqué à 2500 Hz.

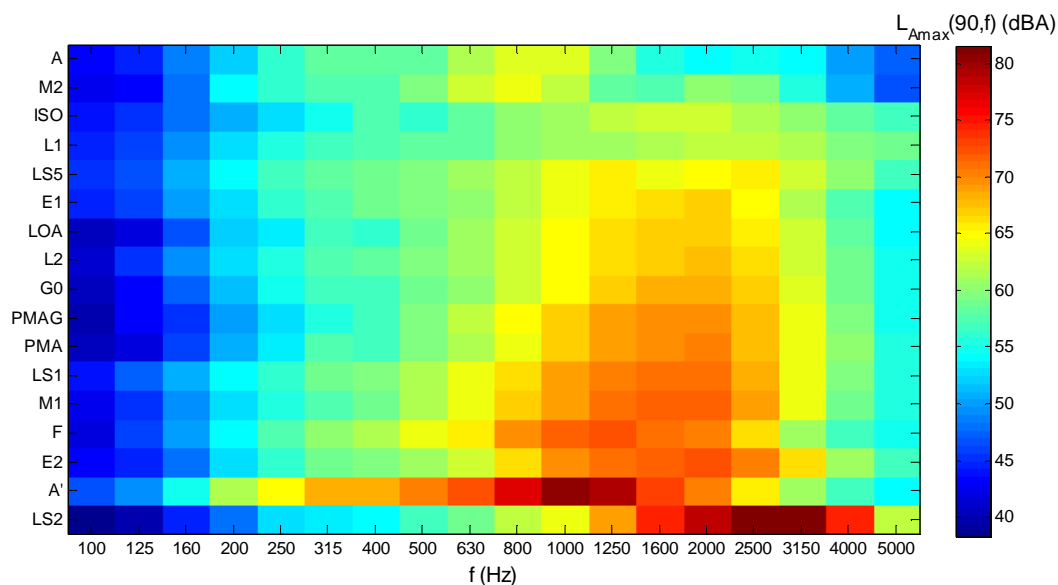


Figure 95 : Représentation qualitative des niveaux de bruit en tiers d'octave mesurés au passage à 90 km/h pour l'ensemble des surfaces testées dans le cas du pneumatique lisse

La Figure 96 compare les spectres mesurés entre 400 Hz et 4000 Hz par la méthode de mesure en continu (en haut) et par la méthode de mesure au passage (en bas) pour l'ensemble de surfaces testées. L'allure des spectres des deux méthodes de mesure est très proche pour la plupart des surfaces. Les observations de la Figure 95 sont confirmées de façon plus qualitative et seront discutées par la suite au § 4.1.4.3.

La corrélation entre les spectres de bruit mesurés par la méthode en continu et ceux mesurés par la méthode au passage est étudiée Figure 97. Le graphe inclut toutes les surfaces testées et chaque point représente le niveau de bruit à une fréquence donnée comprise entre 400 Hz et 4000 Hz. La corrélation entre valeurs spectrale CPX et CB est quasi-parfaite : le coefficient de corrélation est de 0,97 et la pente de la régression est de 1,0. L'atténuation moyenne entre spectres CPX et spectres CB est de $23,9 \pm 3,2$ dBA.

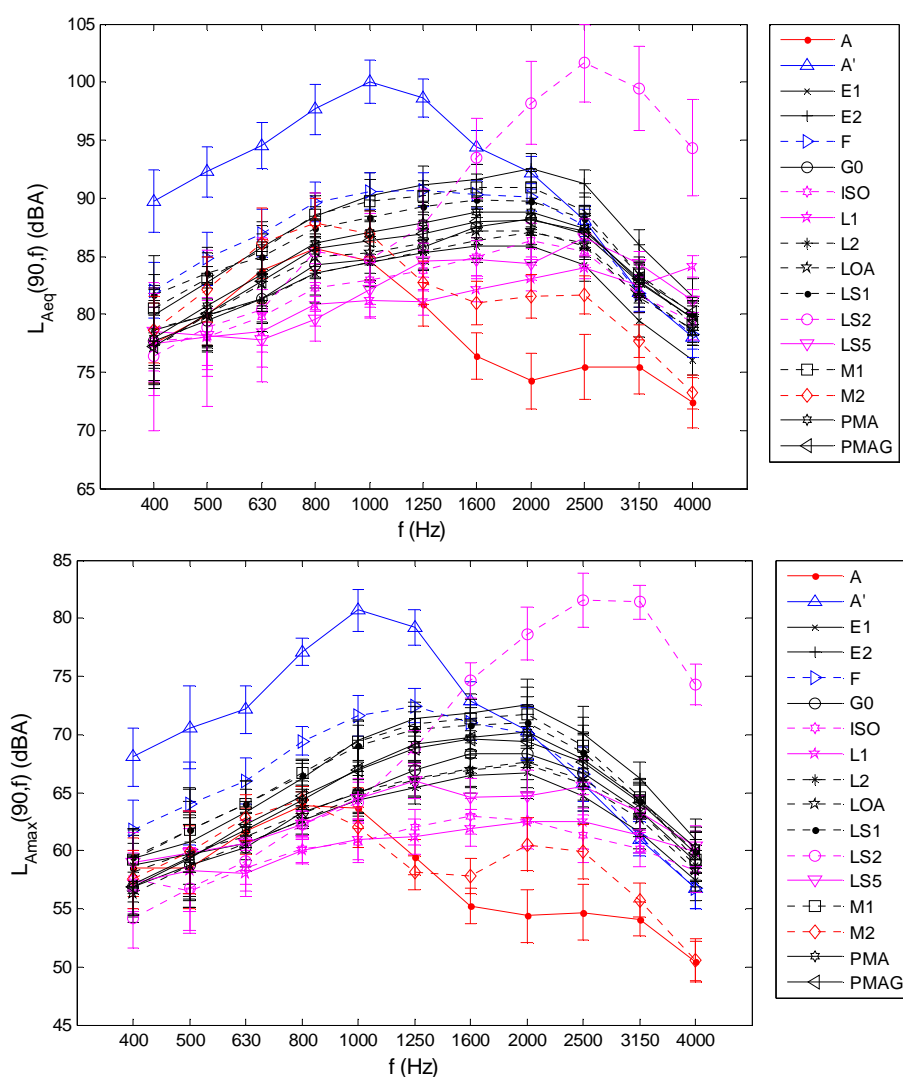


Figure 96 : Comparaison des spectres de bruit mesurés en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h

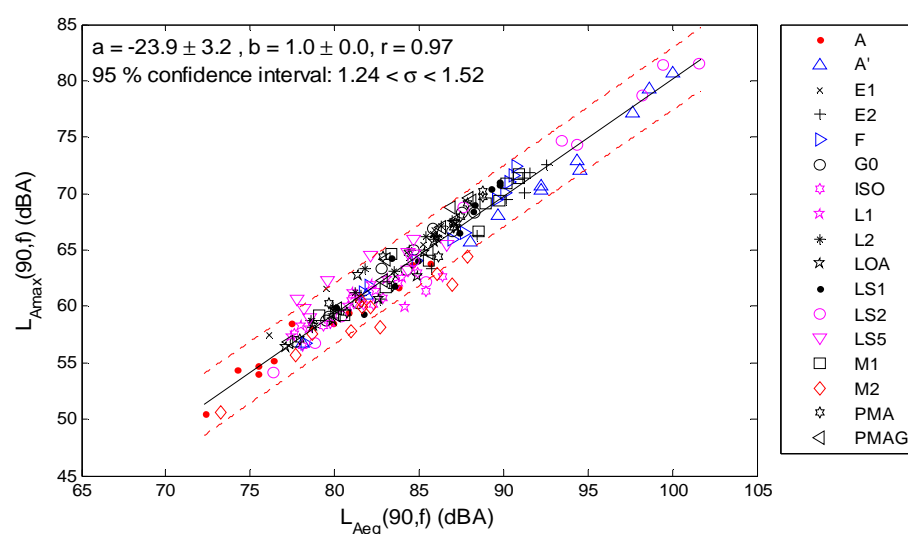


Figure 97 : Corrélation entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h

En complément, la Figure 98 donne pour chaque surface le niveau de bruit par tiers d'octave mesuré au passage en fonction du niveau de bruit par tiers d'octave mesuré en continu. Le graphe inclut toutes les fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz. La corrélation entre spectres CB et spectres CPX est bonne pour la plupart des surfaces : le coefficient de corrélation est proche de 1 et la pente de la régression varie entre 0,7 et 1,2.

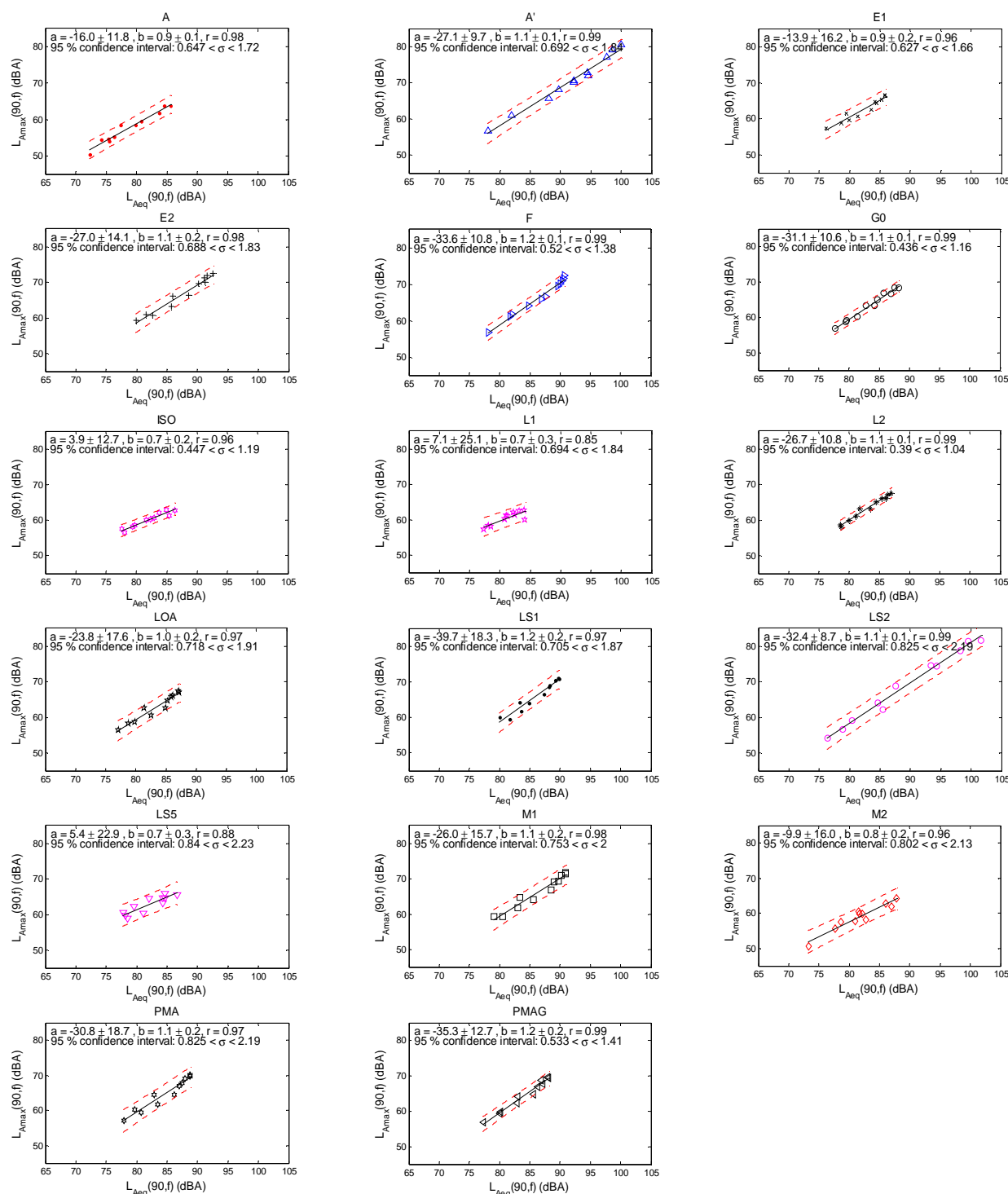


Figure 98 : Corrélation, surface par surface, entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h

4.1.4.3. Analyse des résultats

Pour commencer, la corrélation entre les deux méthodes de mesure du bruit a été démontrée pour les deux types de pneumatiques. Une atténuation de l'ordre de 20 dBA est observée entre les niveaux de bruit CPX et les niveaux de bruit au passage, tandis que les pentes de régression sont presque les mêmes avec les deux méthodes de mesure. Par la suite, les résultats sont donc analysés à partir des mesures CPX uniquement.

Concernant les niveaux de bruit, et sans tenir compte des surfaces lisses ISO, L1, LS2 et LS5, la classification acoustique des surfaces routières (Figures 85 et 92) suit la même tendance pour les deux types de pneumatiques. Les surfaces poreuses (A et M2) sont souvent les plus silencieuses. Puis viennent les surfaces fermées en béton bitumineux dans l'ordre suivant pour le pneumatique à motifs : E1, L2, G0, LOA, PMAG, M1, E2, LS1 et PMA et dans l'ordre qui suit pour le pneumatique lisse : E1, L2, LOA, G0, PMAG, PMA, LS1, M1 et E2. Enfin les enduits superficiels F et surtout A' sont parmi les revêtements les plus bruyants. Les niveaux de bruit pour les surfaces ISO, L1 et LS5 sont beaucoup plus dépendants du type de pneumatique : ces surfaces sont parmi les plus silencieuses pour le pneu lisse et parmi les plus bruyantes pour le pneu à motifs. La surface LS2 est très bruyante quel que soit le type de pneumatique.

Dans l'ensemble, le pneumatique à motifs est souvent plus bruyant que le pneumatique lisse, mais la différence dépend aussi fortement de la surface routière, comme le montre la Figure 99 traçant la différence de niveau de bruit entre le pneumatique à motifs et le pneumatique lisse pour l'ensemble des surfaces testées. Les différences les plus élevées sont observées pour les surfaces lisse L1 (+ 9 dB) ou quasi-lisses ISO (+ 5 dB) et LS5 (+ 6 dB). La différence est comprise entre +1,5 et +4,5 dB pour plusieurs surfaces (A, E1, G0, L2, LOA, LS1, M2, PMA et PMAG). L'écart est proche de zéro pour les surfaces les plus bruyantes comme E2, F et M1 et peut même être négatif pour les surfaces très bruyantes A' (- 2 dB) et LS2 (- 4 dB), ce qui indique que le pneumatique lisse est plus bruyant pour ces surfaces.

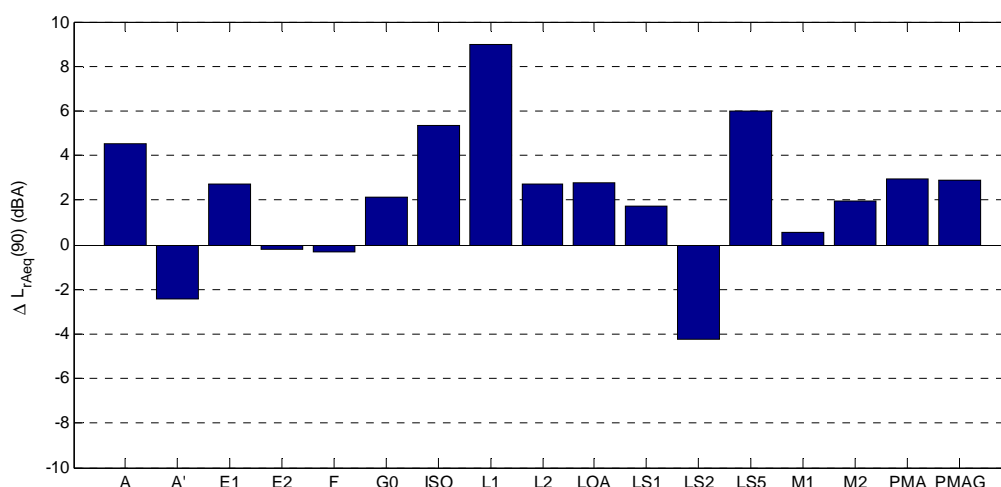


Figure 99 : Différence de niveau de bruit CPX entre le pneumatique à motifs et le pneumatique lisse pour l'ensemble des surfaces testées à la vitesse de 90 km/h

Les valeurs de pente peuvent aussi être analysées pour évaluer les mécanismes de génération de bruit à partir de l'exposant de vitesse (pente divisée par 10) introduit dans [24]. La valeur de la pente est de l'ordre de 20 dBA/dec pour les surfaces poreuses A et M2, correspondant à un exposant de vitesse proche de 2 et, par conséquent, à une domination des mécanismes vibratoire dans la génération du bruit de roulement. Pour ces surfaces, les mécanismes liés au pompage d'air sont réduits par absorption acoustique et ventilation de l'aire de contact. La pente pour les surfaces fermées (E1, E2, G0, L2, LOA, LS1, M1, PMA, PMAG) est comprise entre 25 dBA/dec et 35 dBA/dec, correspondant à un exposant de vitesse compris entre 2,5 et 3,5, ce qui indique probablement un équilibre entre les sources d'origine vibratoire et celles liées au pompage d'air. La pente pour les surfaces A' et F dépend du type de pneumatique (35 dBA/dec pour le pneu à motifs contre 30 dBA/dec pour le pneu lisse), comme pour la surface ISO (30 dBA/dec pour le pneu à motifs contre 20 dBA/dec pour le pneu lisse). La surface L1 a une pente d'environ 40 dBA/dec pour les deux types de pneumatiques, probablement due aux mécanismes de circulation d'air ou aux phénomènes de stick/slip sur cette surface en résine très lisse.

L'analyse précédente peut être approfondie à partir des spectres de bruit en tiers d'octave. Les résultats sont tracés Figure 100 entre 400 Hz et 4000 Hz pour chaque catégorie de revêtements identifiée et pour les deux types de pneumatiques.

Pour les surfaces poreuses (A et M2), les spectres de la Figure 100 sont les mêmes pour les deux types de pneumatiques, avec une valeur maximale à 800 Hz et une réduction du bruit élevée après 1000 Hz par rapport aux surfaces fermées. Pour le pneumatique à motifs, les spectres sont quasi-identiques jusqu'à 1250 Hz, alors que les niveaux de bruit sont environ 2 dBA plus élevés pour la surface M2 dans le cas du pneumatique lisse. Entre 1600 Hz et 3150 Hz, A est plus silencieuse que M2. La différence est de 3 dBA environ pour le pneu à motifs et de 5 dBA environ pour le pneu lisse. Ces résultats peuvent s'expliquer en partie par les propriétés d'absorption de ces surfaces (voir §4.1.3). Le pic d'absorption se situe autour de 1500 Hz pour la surface A et autour de 1000 Hz pour la surface M2. De plus, le coefficient d'absorption est plus élevé pour A que pour M2, expliquant la réduction de bruit supérieure pour la surface A.

Pour les surfaces fermées en béton bitumineux (E1, E2, G0, L2, LOA, LS1, M1, PMA et PMAG), la forme des spectres de la Figure 100 est très différente entre le pneumatique à motifs et le pneumatique lisse. Pour le pneumatique à motifs, un pic très prononcé est observé à 1000 Hz, alors que comparativement les spectres pour le pneumatique lisse sont plutôt plats, avec une valeur maximale aux alentours de 2000 Hz. Le pic à 1000 Hz pour le pneumatique à motifs est principalement dû aux impacts des pains de gomme sur la chaussée au cours du roulement [25]. En effet, la taille caractéristique des pains de gomme est d'environ 25 mm, conduisant à une fréquence d'impact fondamentale de 1000 Hz à 90 km/h.

Pour les surfaces lisse ou quasi-lisses (ISO, L1, LS2 et LS5), qui sont des surfaces fermées, ici encore la forme des spectres est très différente d'un type de pneumatique à l'autre. Pour le pneumatique à motifs, le pic à 1000 Hz est toujours très prononcé et un deuxième pic plus faible est observé à 2000 Hz. Comme précédemment, cela s'explique par la fréquence d'impact des pains de gomme fondamentale de 1000 Hz à 90 km/h et son harmonique à 2000 Hz. Au contraire, les spectres pour le pneumatique lisse sont plutôt plats pour les surfaces ISO et L1, avec aucune fréquence dominante entre 400 Hz et 4000 Hz et des niveaux de bruit assez faible. En effet, le pneu roulant sur une surface plane lisse (ou quasi-lisse) atteint un régime stationnaire sans émergence de fréquence particulière. En revanche, pour la surface LS2 constituée de trous répartis périodiquement, un pic très élevé est observé à 2500 Hz, ce qui correspond à une taille caractéristique de 10 mm à 90 km/h, soit à peu près le diamètre des trous constituant la surface. Pour la surface LS5 constituée de rainures longitudinales, deux pics de faible amplitude sont observés à 1250 Hz et 2500 Hz, probablement liés aux dimensions des rainures.

Pour les enduits superficiels (A' et F), les spectres sont assez similaires pour les deux types de pneumatiques. Pour le pneumatique à motifs, la majeure partie de l'énergie acoustique est comprise entre 400 Hz et 1600 Hz, avec un pic très important à 1000 Hz. La différence entre A' et F est d'environ 3 à 7 dBA dans la gamme 400-1250 Hz, alors qu'entre 1600 Hz et 4000 Hz les spectres sont presque les mêmes. Ces résultats s'expliquent par une forte excitation vibratoire du pneumatique sur ces surfaces très rugueuses. Pour le pneumatique lisse, quelques différences peuvent être remarquées. L'énergie acoustique est comprise sur une plus large gamme de fréquences comprise entre 400 Hz et 2500 Hz en comparaison avec le pneu à motifs. Un pic à 1000 Hz est clairement observé pour la surface A', alors qu'en comparaison le spectre pour la surface F est plutôt plat entre 400 Hz et 2500 Hz. Les spectres sont presque les mêmes entre 2500 Hz et 4000 Hz.

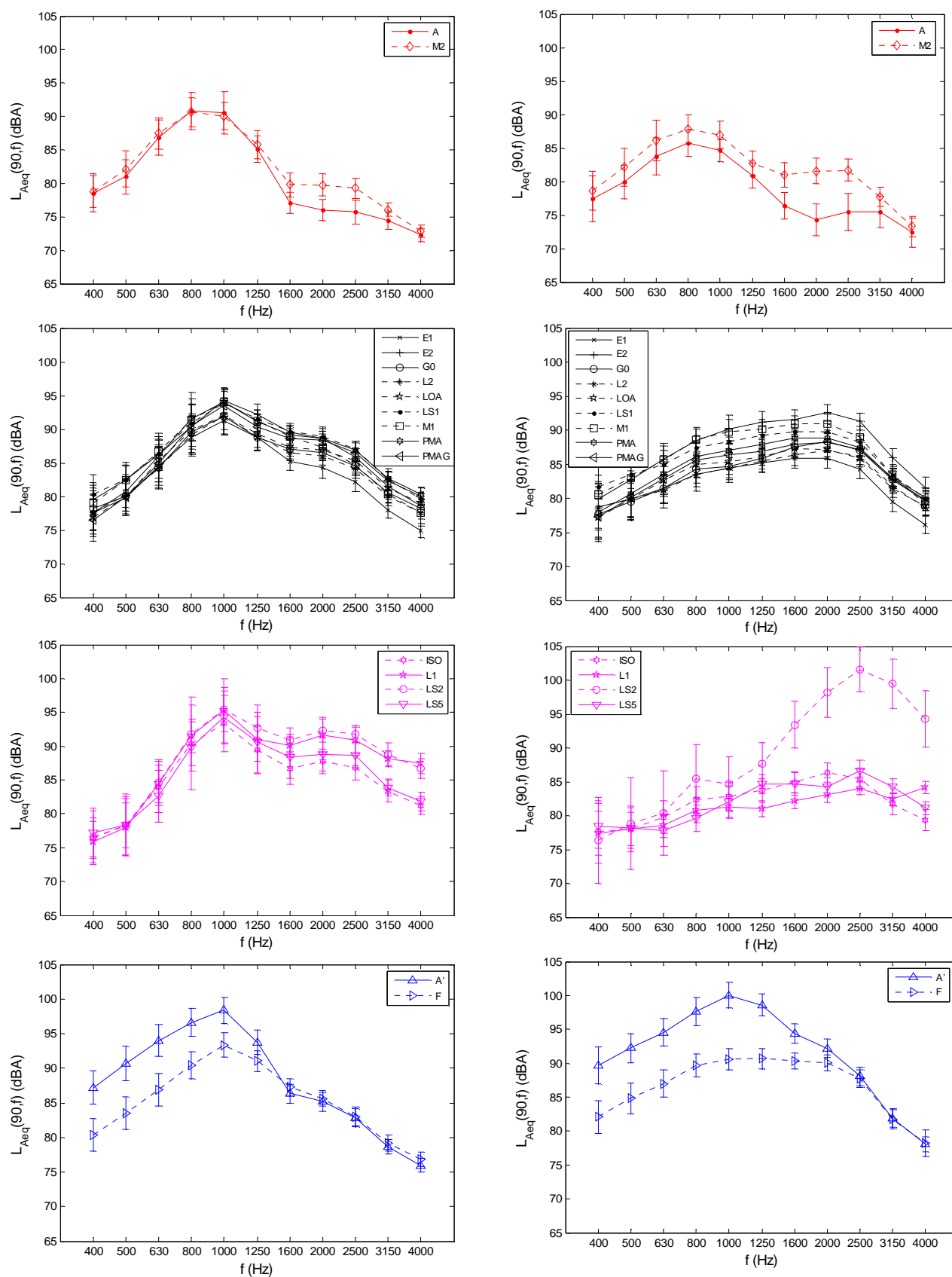


Figure 100 : Spectres CPX distinguant les quatre catégories de revêtements de chaussée pour le pneumatique à motifs (colonne de gauche) et le pneumatique lisse (colonne de droite)

4.2. Approche hybride pour la prévision du bruit (modèle HyRoNE)

Le modèle HyRoNE (Hybrid Rolling Noise Estimation) est un modèle qui a pour but la prévision des niveaux de bruit au passage d'un véhicule léger à partir de la texture du revêtement routier et de ses éventuelles propriétés d'absorption acoustique. Il s'agit d'un modèle qualifié d'« hybride », au même titre que le modèle allemand SPERoN, qui combine des modèles physiques simplifiés et des lois statistiques. Il requiert des données expérimentales de texture, de bruit de roulement et éventuellement d'absorption acoustique pour permettre le calage de ces lois statistiques. Le modèle a été développé dans le cadre du projet Prédit « Texture&Bruit ». Le précédent projet P2RN a permis d'apporter un certain nombre d'éléments de validation du modèle [26, 27].

La version P2RN du modèle est basée sur l'utilisation de profils de textures pour la prévision des niveaux de bruit. En particulier, le modèle utilise la texture « enveloppée » pour la prévision des niveaux de bruit dans le domaine des basses et moyennes fréquences. La version actuelle utilise une procédure d'« enveloppement » en 2D adaptée aux profils 2D. La mesure de texture 3D réalisée dans le cadre du projet ODSurf permet d'envisager de prendre en compte une information tridimensionnelle pour la prévision des niveaux de bruit.

La présente partie est divisée en 4 sous-parties. Dans la première, le principe de la version P2RN du modèle est présenté. Dans la seconde, le modèle est construit en utilisant certaines des données mesurées dans le cadre du projet, présentées dans la partie 4.1. La troisième partie est consacrée au développement d'une procédure d'enveloppement tridimensionnel. Enfin, dans la quatrième partie, on évalue le bénéfice apporté par l'enveloppement 3D par rapport à l'enveloppement 2D pour la prévision des niveaux de bruit.

4.2.1. Principe du modèle HyRoNE

Le modèle HyRoNE est basé sur l'estimation des niveaux de bruit par bandes de tiers d'octave (entre 100 Hz et 5 kHz pour la prévision des niveaux de bruit au passage) à partir des niveaux de texture brute ou enveloppée par bandes de tiers d'octave. La donnée d'entrée principale de la version P2RN du modèle consiste en des profils de texture bidimensionnelle qui ne permettent pas de prendre en compte l'éventuelle anisotropie des surfaces de chaussée.

Dans le domaine des basses et moyennes fréquences où la génération du bruit est principalement due à la vibration et au rayonnement du pneumatique, on utilise les niveaux de texture enveloppée pour tenir compte du contact partiel entre la gomme du pneumatique et les rugosités du revêtement routier. La texture enveloppée est évaluée à l'aide d'un modèle de contact statique entre le profil de chaussée et un massif élastique semi-infini caractérisé par son module d'Young E , son coefficient de Poisson étant pris égal à 0,5 (voir la Figure 101) [28]. Le profil enveloppé correspond à la déformée de la partie inférieure du massif élastique. L'une des particularités du modèle de contact 2D utilisé est que le problème est considéré comme périodique pour éviter les effets de bords qui conduisent inévitablement sans cette précaution à des suppressions au bord de l'échantillon considéré et une sous-pression en son centre. Cette particularité du modèle est prise en compte par l'utilisation d'une fonction de Green (qui donne le déplacement de la frontière du massif élastique pour une force appliquée en un point donné) elle-même périodique qui permet de calculer le profil enveloppé directement sur l'échantillon considéré.

Dans le domaine des hautes fréquences, dans lequel les phénomènes de pompage d'air sont considérés comme mécanismes prédominants dans la génération du bruit, c'est le niveau de texture brute qui est utilisé car il est considéré comme plus représentatif de la porosité latérale susceptible de réduire les mécanismes de compressions à l'œuvre dans le pompage d'air.

Une fois les niveaux induits par la texture évalués à partir des niveaux de texture brute ou enveloppée, une correction peut-être apportée pour tenir compte d'éventuelles propriétés d'absorption acoustique du revêtement. Cette correction prend pour l'instant uniquement en compte l'effet de la propagation entre le véhicule et le point d'évaluation du bruit au passage. Pour ce faire, on considère la source comme omnidirectionnelle, placée sur le sol. Le matériau de chaussée est assimilé à un milieu poreux caractérisé par ses résistance au passage de l'air, porosité, facteur de forme et épaisseur (cf. paragraphes 3.3.3 et 4.1.3). La correction apportée correspond à l'atténuation calculée par rapport à une surface parfaitement réfléchissante. Le schéma de calcul des niveaux de bruit à partir des caractéristiques du revêtement est donné sur la Figure 102.

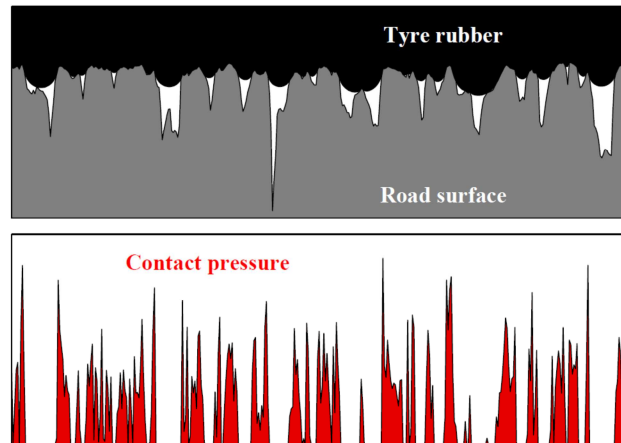


Figure 101 : Procédure d'enveloppement 2D – En haut : Massif élastique semi-infini écrasé sur un profil de texture – En bas : distribution de pression de contact évaluée conjointement

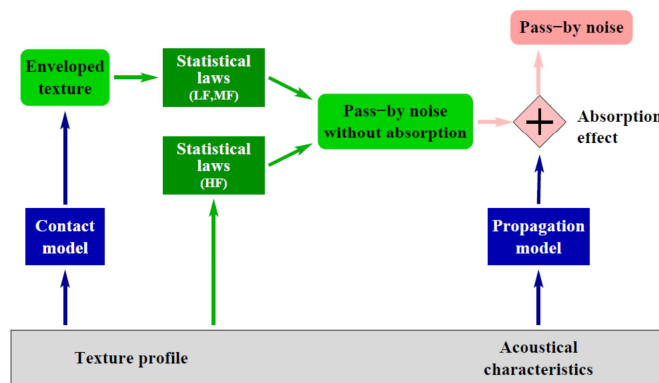


Figure 102 : Schéma de calcul des niveaux de bruit par le modèle HyRoNE

Le niveau de bruit L à la fréquence f_i est ainsi donné par les relations :

$$\begin{aligned} L(f_i) &= a(f_i) + b(f_i)L_{et}(V/f_i) + \Delta L_p(f_i) \quad , \quad f_i \leq f_t \\ &= a(f_i) + b(f_i)L_t(V/f_i) + \Delta L_p(f_i) \quad , \quad f_i > f_t \end{aligned} \quad (14)$$

Dans ces expressions, V désigne la vitesse de roulement, $L_{et}(V/f_i)$ et $L_t(V/f_i)$ les niveaux de texture enveloppée et brute évalués aux longueurs d'onde $\lambda_i = V/f_i$, $\Delta L_p(f_i)$ l'atténuation due à l'absorption acoustique et f_t la fréquence de transition entre domaines d'utilisation de la texture enveloppée et de la texture brute.

La phase de construction du modèle consiste à déterminer le paramètre d'enveloppement E optimal, la fréquence de transition f_t , ainsi que les coefficients a et b des lois statistiques correspondantes.

4.2.2. Construction du modèle HyRoNE 2D avec les données ODSurf

La construction du modèle HyRoNE dans le cadre du précédent projet P2RN avait été réalisée pour un seul pneumatique : le pneumatique standard E3A également utilisé dans ODSurf, sur la base de relevés de texture mesurés avec un profilomètre bidimensionnel. La construction avait été réalisée pour plusieurs vitesses nominales en prenant en compte des revêtements denses et des revêtements absorbants. Pour la vitesse nominale de 90 km/h, la fréquence de transition s'élevait à 1250 Hz, la valeur du paramètre d'enveloppement 2D à 6 MPa.

Le calage du modèle HyRoNE a été entrepris en utilisant la base de données collectée dans le cadre du projet, décrite dans la tâche 3. N'ont été pris en compte pour cela que les revêtements denses ou très peu absorbants à texture conventionnelle de manière à s'affranchir de possibles biais introduits par la correction pour effet d'absorption. Le calage du modèle a donc été réalisé en utilisant 11 revêtements : A', E1, E2, G0, ISO, L2, LOA, LS1, M1, PMA, et PMAG. La particularité de ce jeu de données est qu'il comprend un revêtement à faible rugosité, la planche ISO, ce qui n'était pas le cas dans le modèle P2RN.

Le modèle a été calé pour la vitesse nominale de 90 km/h pour la prévision des niveaux de bruit au passage avec les deux pneumatiques utilisés pour les mesures de bruit : le pneumatique sculpté E3A et le pneumatique lisse. La valeur optimale du paramètre d'enveloppement obtenue est sensiblement identique pour les deux pneumatiques et s'élève à 3 MPa. Concernant la fréquence de transition entre domaines d'utilisation de la texture enveloppée et de la texture brute, la même fréquence a été identifiée pour le pneumatique sculpté que pour le calage P2RN, à savoir 1250 Hz. Pour le pneumatique lisse, la fréquence de transition a été évaluée à 2 kHz.

La correspondance modèle/mesure entre niveaux globaux reconstruits à partir des niveaux par bande de tiers d'octave est donnée sur la Figure 103 pour les deux pneumatiques. Sur les deux graphes sont représentées en trait continu noir la droite de régression évaluée entre niveaux prédits et mesurés et en trait tireté noir la droite de correspondance idéale. Pour le pneumatique lisse, la correspondance modèle/mesure est assez bonne. L'écart moyen entre niveaux globaux prédits et mesurés s'élève à 0,8 dBA. Cependant l'erreur commise sur la planche la plus bruyante (planche A') atteint 2 dBA. Pour le pneumatique sculpté, la correspondance modèle/mesure est dégradée. L'écart moyen constaté s'élève à 1,0 dBA. Les niveaux globaux des deux planches extrêmes (planches ISO et A') sont tous deux sous évalués de presque 2 dBA.

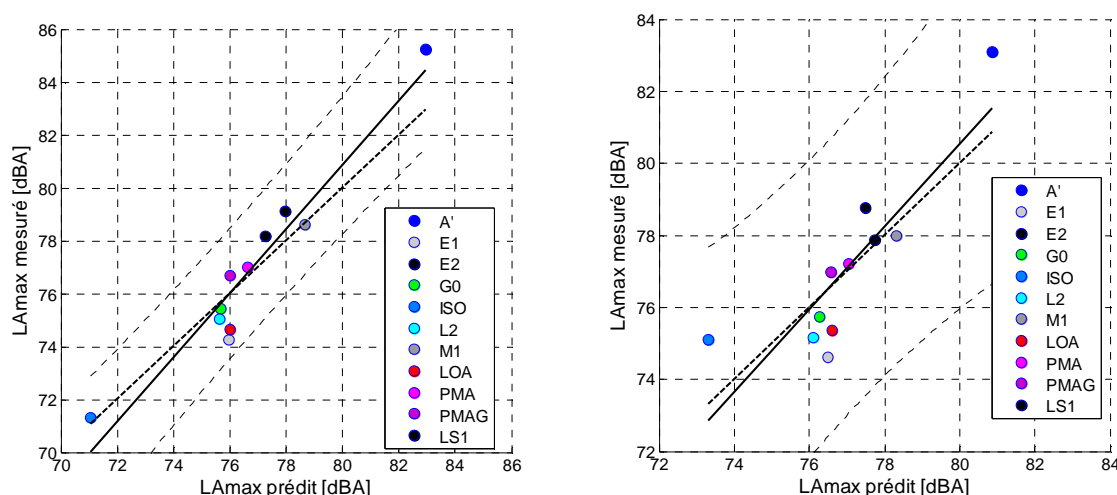


Figure 103 : Correspondance modèle / mesure en termes de niveaux globaux reconstruits pour le pneumatique lisse (à gauche) et le pneumatique sculpté (à droite)

La Figure 104 donne une illustration d'une cause identifiée expliquant la correspondance modèle/mesure dégradée avec le pneumatique sculpté par rapport au pneumatique lisse. Cette figure représente l'évolution des niveaux de bruit dans un tiers d'octave donné (ici 500 Hz) en fonction des niveaux de texture 2D enveloppée pour les 11 surfaces conventionnelles considérées. On peut constater que la présence d'un revêtement relativement peu rugueux (la planche ISO) provoque une légère inflexion de la relation texture/bruit pour les faibles niveaux de texture. Il est possible de construire un modèle simple à deux contributions incohérentes, l'une constante indépendante du niveau de texture enveloppée (représentée par la droite horizontale en pointillés), l'autre en dépendant linéairement (droite ascendante en pointillés), la somme des deux étant représentée par la courbe en trait continu noir qui s'ajuste assez bien aux points de mesure. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ce comportement sur surfaces peu rugueuses. La contribution indépendante de la texture enveloppée peut être due au phénomène de pompage d'air connu pour être amplifié sur les surfaces lisses. Elle pourrait être due également à la contribution des pains de gomme du pneumatique qui se combinent à la rugosité du revêtement pour produire un niveau de bruit dû à la vibration du pneumatique plus élevé qu'attendu, l'influence relative des pains de gomme étant d'autant plus importante que la rugosité enveloppée du revêtement est faible.

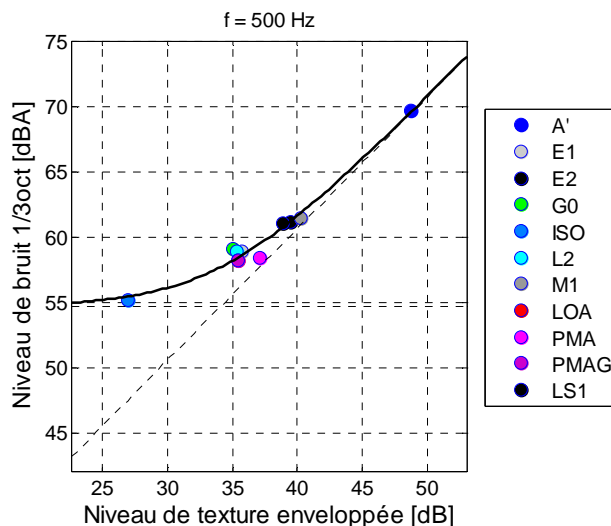


Figure 104 : Relation entre niveaux de bruit au passage et niveaux de texture enveloppée dans le tiers d'octave 500 Hz

Ce modèle simple à deux contributions permet d'améliorer la prévision du bruit aux fréquences inférieures à 630 Hz voire 800 Hz mais sans expliciter l'origine du mécanisme additionnel sur les revêtements à niveaux de texture enveloppée faibles. Si l'on veut, à terme, pouvoir séparer plus facilement les contributions sonores dues à la vibration et au rayonnement du pneumatique d'une part, au pompage d'air d'autre part, il faut pouvoir s'affranchir de l'incertitude quant au mécanisme affectant ce comportement sur les surfaces peu rugueuses en élaborant une méthode permettant de prendre en compte la rugosité combinée pneumatique/revêtement pour la prévision de la composante du bruit due à la vibration du pneumatique. Plusieurs approches sont possibles pour cela. La prise en compte des efforts de contact donnés par le modèle de contact multi-aspérités, présenté en 4.3, prenant en compte les deux rugosités en est une. Dans la suite de cette partie, une solution basée sur un enveloppement 3D est proposée.

4.2.3. Enveloppement 3D

4.2.3.1. Motivations

Equivalence entre enveloppements 2D et 3D

La première des motivations pour construire une méthode d'enveloppement 3D est de constater que les enveloppements 2D et 3D ne sont pas équivalents. La méthode d'enveloppement 2D revient à considérer la texture du revêtement comme une tôle ondulée. Or la texture des revêtements conventionnels est de nature isotrope. Pour mettre en évidence cela, des enveloppements 2D et 3D ont été calculés sur plusieurs surfaces puis comparés en termes de spectre de texture enveloppée.

La méthode d'enveloppement 2D pour cette comparaison est celle succinctement présentée au paragraphe 4.2.1. La méthode d'enveloppement 3D utilisée pour cette comparaison est basée également sur un modèle de contact entre la surface du revêtement et un massif élastique semi-infini caractérisé par son module d'Young et son coefficient de Poisson pris égal à 0,5. Dans ce cas 3D, le problème est également périodisé dans les deux directions pour s'affranchir des effets de bord. Comme pour le cas 2D, le problème est rendu périodique au travers de la fonction de Green. L'algorithme utilisé est l'algorithme de Kalker [29] qui procède par inversion de matrice ce qui nécessite des calculs importants en termes de mémoire et de temps de calcul.

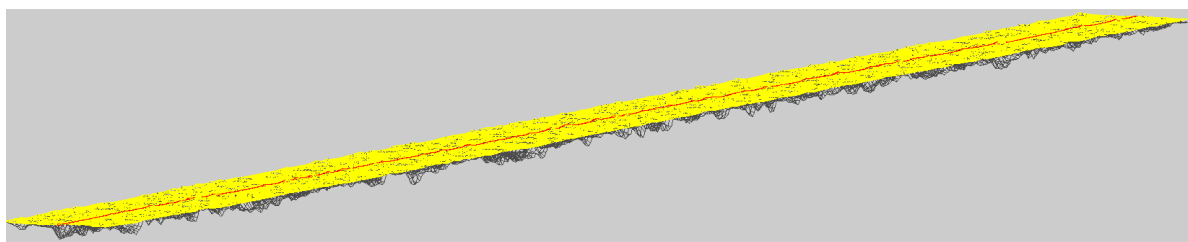


Figure 105 : Exemple d'enveloppement 3D périodique obtenu sur une surface de 25 mm x 500 mm à la résolution de 0,8 mm

L'approche adoptée pour la comparaison 2D/3D est d'extraire, pour chaque surface considérée, des relevés de texture de 25 mm de largeur et de 0,5 m de longueur à une résolution dégradée par un facteur 8 (résolution égale à 0,8 mm). Sur chaque surface extraite, un enveloppement 2D est réalisé sur le profil longitudinal médian ainsi qu'un enveloppement 3D duquel est extrait le profil longitudinal médian. Un exemple d'enveloppement 3D périodique est donné Figure 105. Le profil enveloppé médian est représenté en rouge. Les spectres évalués à partir des profils enveloppés en 2D et en 3D sont ensuite moyennés sur l'ensemble des échantillons extraits.

On considère comme référence de comparaison les niveaux de texture obtenus après enveloppement 2D pour une valeur E_0 du module d'Young (choisie égale à 6 MPa) sur la gamme de longueur d'onde comprise entre 8 mm et 250 mm. On cherche ensuite à trouver la valeur du module d'Young E pour laquelle on obtient le même niveau de texture après enveloppement 3D. Pour ce faire, sur la Figure 106 sont tracées les différences entre les niveaux de texture enveloppée en 3D et les niveaux de texture enveloppée 2D de référence, pour plusieurs valeurs de paramètre d'enveloppement 3D (E) répartis selon une suite géométrique entre 1 MPa (courbes bleues) et 5 MPa (courbes brunes), ceci pour 4 revêtements différents (A', A, E2 et ISO). On peut tout d'abord observer que quel que soit le revêtement considéré, la valeur de E pour laquelle il y a égalité entre niveaux dépend de la longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est grande, plus la valeur de E pour laquelle il y a égalité est petite. De plus, pour une longueur d'onde considérée, la valeur de E pour laquelle il y a égalité de niveaux enveloppés 2D et 3D dépend du revêtement considéré. Il n'y a pas donc pas équivalence entre enveloppement 2D et enveloppement 3D.

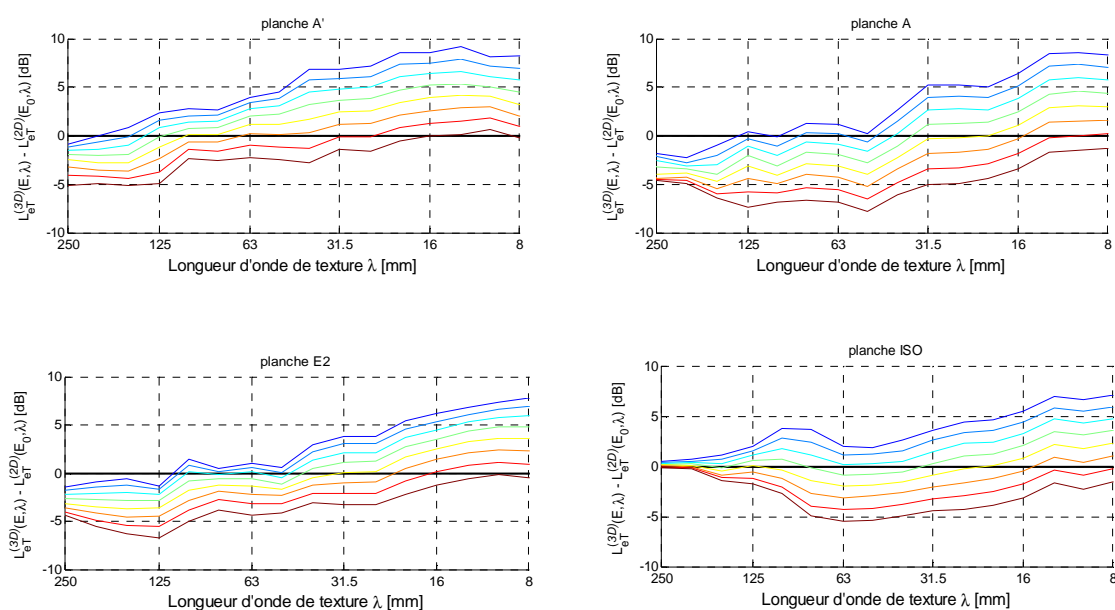


Figure 106 : Différence entre les niveaux de texture enveloppée 3D pour plusieurs valeurs de E et les niveaux de texture enveloppée 2D de référence $E_0=6$ MPa pour 4 planches différentes

Natures des rugosités des surfaces routières et de celle du pneumatique :

La deuxième motivation pour le développement d'une méthode d'enveloppement 3D réside dans la nature différente des rugosités des revêtements routiers (conventionnels) et des motifs du pneumatique. La texture des revêtements routiers conventionnels est de nature aléatoire et isotrope. Les motifs de la bande de roulement d'un pneumatique sculpté sont de nature déterministe et anisotrope, pouvant s'apparenter sur certaines zones à une texture 2D de type tôle ondulée du fait de la présence de rainures majoritairement orientée transversalement par rapport à la direction de roulement. La non équivalence entre enveloppements 2D et 3D montrent qu'en utilisant un enveloppement 2D sur les textures routières isotropes, il est délicat de trouver une valeur de paramètre d'enveloppement qui soit adaptée au calcul d'enveloppement sur le pneumatique à rainures transversales. L'enveloppement 2D n'est pas adapté à la prise en compte d'une rugosité combinée revêtement/pneumatique sculpté.

4.2.3.2. Donnée d'entrée pour le calcul d'enveloppement 3D

La donnée d'entrée pour le calcul d'enveloppement 3D proposée est la rugosité combinée tridimensionnelle de la bande de roulement du pneumatique et de la texture du revêtement obtenue par simple sommation des altitudes. Elle est illustrée sur la Figure 107.

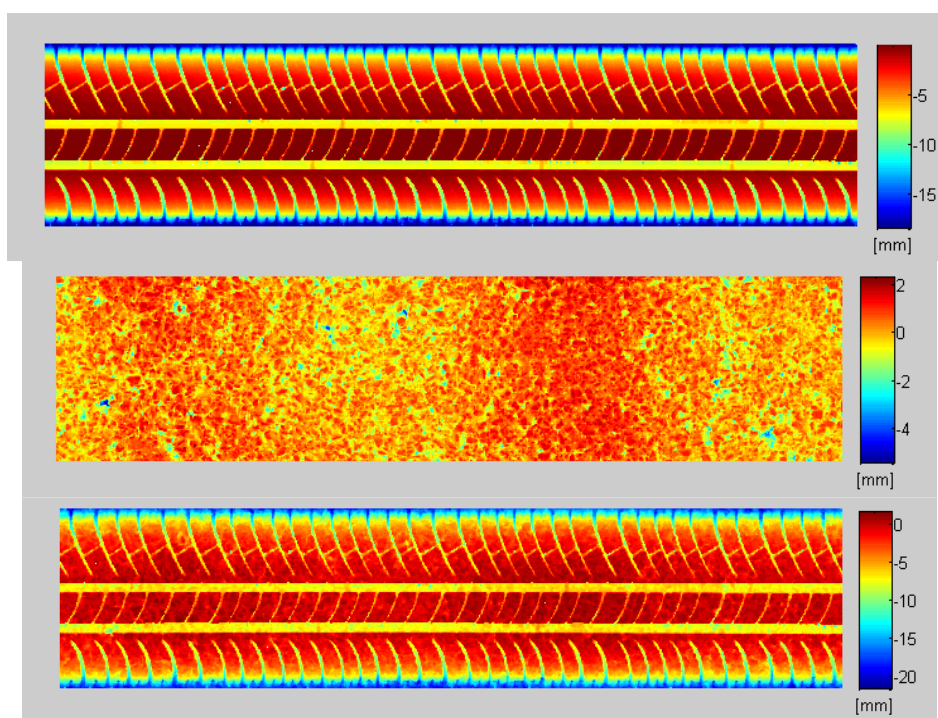


Figure 107 : Donnée d'entrée de la procédure d'enveloppement 3D – Haut : bande de roulement du pneumatique – Centre : texture du revêtement – Bas : rugosité combinée pneumatique/revêtement

4.2.3.3. Méthode de calcul

Le calcul de contact statique tel que décrit pour l'analyse de l'équivalence entre enveloppements 2D et 3D requiert d'importantes capacités de calcul. Il est envisageable de réaliser un tel calcul sur la largeur totale du pneumatique et sur une longueur importante telle que celle sur laquelle sont calculés les profils enveloppés en 2D (au moins 1,50 m) voire même sur la longueur de la zone de contact pneumatique/chaussée. La méthode d'enveloppement 3D proposée ici est d'évaluer le contact entre la rugosité combinée pneumatique/chaussée sur la toute la largeur du pneumatique mais sur une longueur dans le sens du roulement réduite tout en assurant que le résultat soit identique ou très proche de celui qui serait obtenu sur une longueur plus importante. Une longueur de 25 mm a été évaluée comme suffisante pour cela. L'enveloppement est obtenu en considérant donc un massif élastique de 25 mm de longueur, de la largeur du pneumatique, qui est déplacé dans le sens du roulement sur toute la longueur du relevé. Pour

chaque position, un calcul de contact statique est effectué. Ce calcul est périodisé dans le sens du roulement de manière à éviter les effets de bords longitudinaux. Il n'est pas nécessaire de périodiser le calcul transversalement. Pour chaque position de calcul statique, on retient le profil enveloppé médian. La texture enveloppée finale est constituée par la juxtaposition des profils enveloppés médians évalués pour les différentes positions du massif glissant. La méthode est illustrée Figure 108.

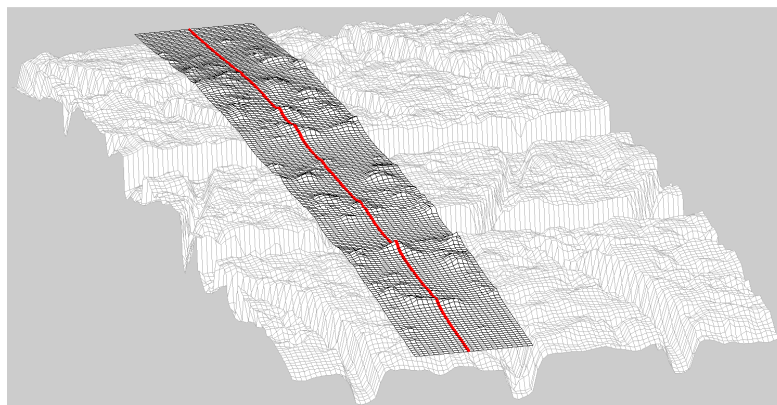


Figure 108 : Méthode de calcul de l'enveloppement 3D – En blanc : rugosité combinée – En noir : bloc de gomme glissant – En rouge : profil médian retenu

Un exemple de surface enveloppée obtenue par cette méthode est donnée Figure 109 ainsi qu'un extrait de la carte de pression de contact obtenue par le même procédé (juxtaposition des pressions de contact évaluée sur le profil médian). On reconnaît sur les deux cartes les rainures longitudinales du pneumatique sculpté et on devine les rainures transversales.

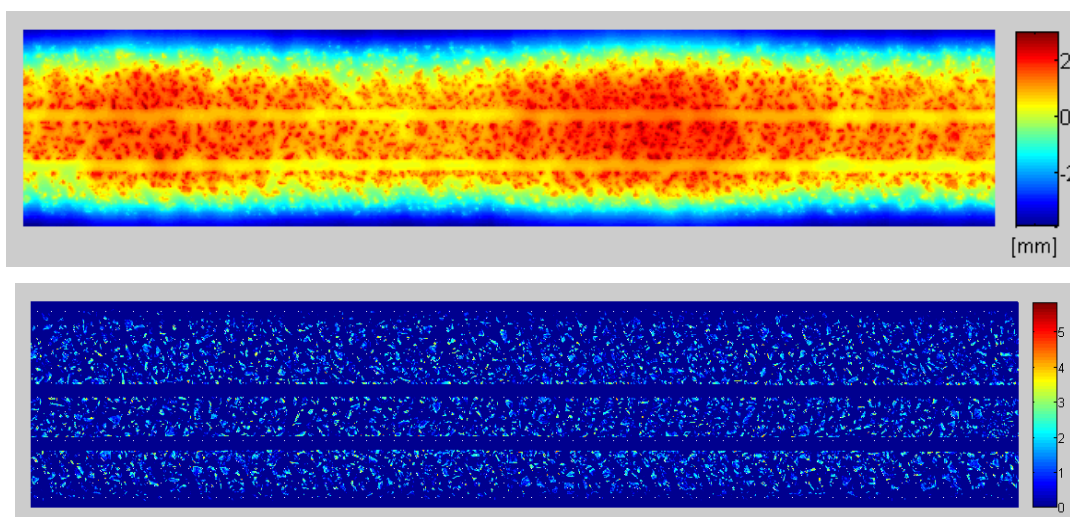


Figure 109: Résultats de calcul de l'enveloppement 3D – En haut : surface enveloppée – En bas : carte de pressions de contact (échelle en MPa)

4.2.3.4. Sorties du modèle

Les données de sortie de la procédure d'enveloppement 3D sont des profils longitudinaux extraits de la surface enveloppée. La position de ces profils est choisie en s'aidant de la répartition de pression

transversale moyennée sur la longueur du relevé. Deux exemples de distribution de pression moyennée sont donnés Figure 110, l'une obtenue avec un pneumatique lisse, l'autre obtenue avec le pneumatique sculpté. Dans ce cas, 8 profils sont extraits, répartis à pas constant pour le pneumatique lisse, en évitant les rainures longitudinales pour le pneumatique sculpté, entre les positions latérales de 0,03 m à 0,017 m.

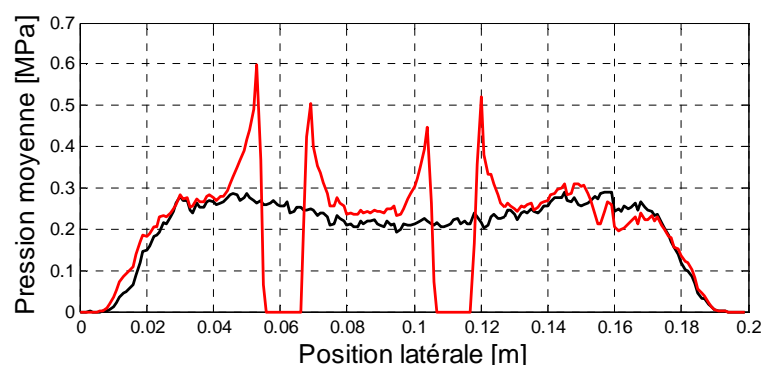


Figure 110 : Distribution transversale de pression moyennée sur la longueur du relevé pour le pneumatique lisse (courbe noire) et le pneumatique sculpté (courbe rouge)

Des exemples de profils extraits sont donnés Figure 111 sur une longueur de 1m.

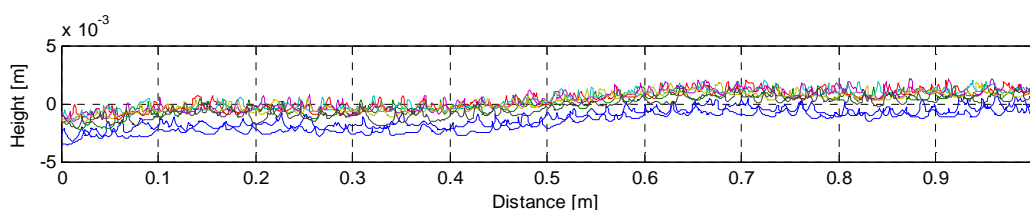


Figure 111 : Exemples de profils extraits

Les profils extraits font ensuite l'objet d'une analyse spectrale telle que celle décrite au paragraphe 3.3.2.2. On obtient ainsi des spectres de texture 3D enveloppée. Les spectres de texture enveloppée obtenus ainsi pour une valeur de module d'Young de 4 MPa sont donnés Figure 112 pour l'ensemble des revêtements utilisés précédemment pour le calage du modèle 2D, pour un pneumatique lisse, et pour un pneumatique sculpté (la forme d'ensemble de pneumatique lisse a été choisie identique à celle du pneumatique sculpté). On a rajouté sur le graphe concernant ce dernier le spectre enveloppé obtenu pour une surface de revêtement parfaitement lisse en trait tireté. Les spectres enveloppés obtenus avec le pneu lisse présentent une étendue importante, supérieure à 20 dB pour certaines fréquences. Les niveaux les plus bas sont ceux obtenus pour la planche ISO, les plus élevés sont ceux de la planche A'. Pour le pneumatique sculpté, l'étendue est fortement réduite aux fréquences correspondant au défilement des pains de gomme. On peut noter deux pics à 1 kHz et à 2 kHz qui correspondent à 90 km/h aux longueurs d'onde de 25 mm et 12,5 mm. Les spectres de rugosité combinée obtenus sur les revêtements sont plus ou moins affectés autour de ces fréquences. Ce sont les niveaux de la planche ISO qui sont le plus affectés, tandis que ceux de la planche A' ne le sont pratiquement pas.

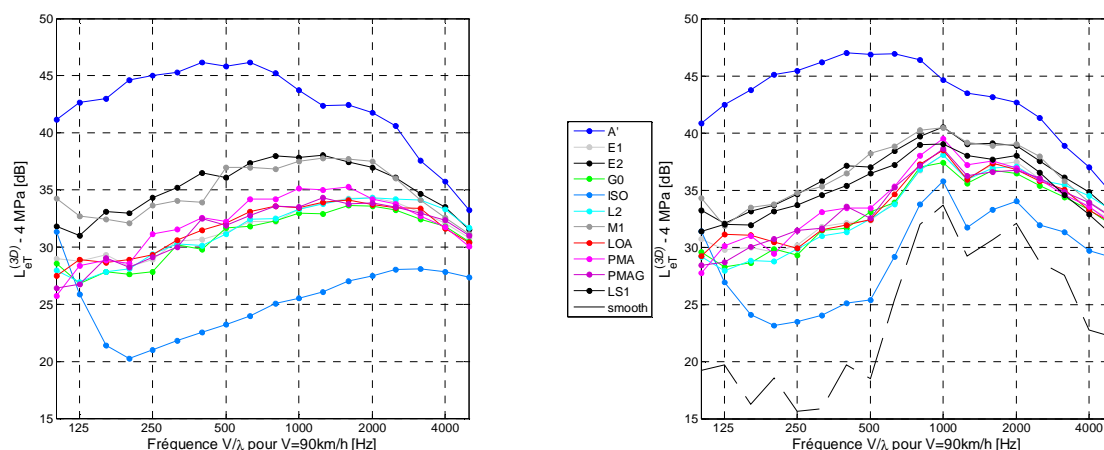


Figure 112 : Spectres de texture enveloppée en 3D en fonction de la fréquence temporelle pour une vitesse V de 90 km/h – A gauche : pneumatique sans motifs – A droite : pneumatique sculpté

4.2.4. Corrélations bruit/texture enveloppée et prévision des niveaux de bruit

Les calculs d'enveloppement 3D n'ont été réalisés que pour une valeur de module d'Young du massif élastique égale à 4 MPa qui n'a pas été ajustée pour obtenir la meilleure prévision des niveaux de bruit globaux comme pour le modèle 2D. Cependant, on peut considérer que la valeur choisie est assez réaliste.

4.2.4.1. Corrélations bruit/texture enveloppée

Les cartes de corrélations présentées Figure 113 représentent les valeurs de coefficient de corrélation obtenue entre niveaux de bruit mesurés avec le pneumatique sculpté à une fréquence f_i comprise entre 100 Hz et 5 kHz et niveaux de texture enveloppée à une fréquence $f_j = V / \lambda_j$ dans la même gamme fréquentielle, pour l'ensemble des 11 revêtements non absorbants utilisés pour le calage du modèle 2D. Sur la diagonale de chaque carte, on a la correspondance $f_i = f_j$. La carte de gauche est celle obtenue avec l'enveloppement 2D ; la carte de droite est obtenue avec l'enveloppement 3D de la rugosité combinée pneumatique/revêtement. Sur les deux cartes, on peut constater des coefficients de corrélation assez bons entre 250 Hz et 1250 Hz, fréquence de transition identifiée plus haut pour le pneumatique sculpté. Au-delà de cette fréquence, on observe des corrélations moins bonnes. On peut constater également que les corrélations en basses et moyennes fréquences sont sensiblement meilleures avec l'enveloppement 3D qu'avec l'enveloppement 2D et que la zone des coefficients de corrélation les plus élevés est recentrée sur la diagonale.

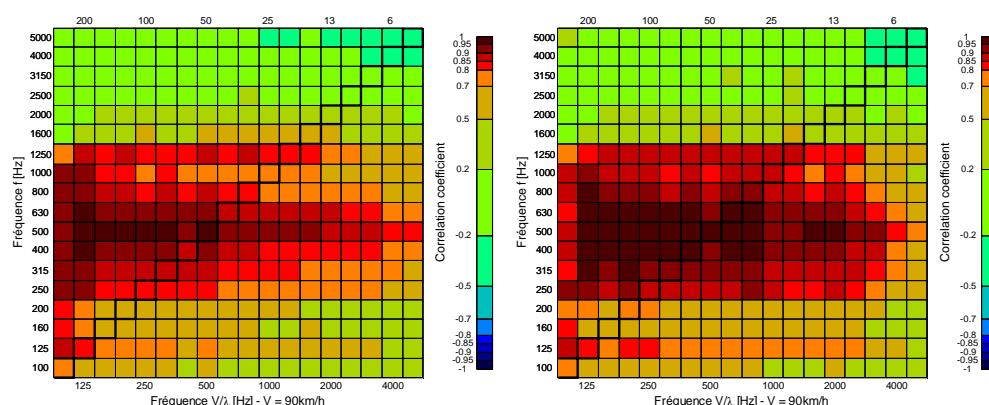


Figure 113 : Cartes de corrélation texture enveloppée/bruit du pneu sculpté- A gauche : enveloppement 2D – A droite : enveloppement 3D

4.2.4.2. Prédiction des niveaux de bruit des revêtements denses

Le modèle HyRoNE complet intégrant le calcul d'enveloppement 3D à la place de l'enveloppement 2D a été testé sur le jeu de revêtements utilisés pour sa construction. La correspondance modèle/mesure en termes de niveaux globaux reconstruits pour le pneumatique sculpté à 90 km/h est donnée sur la Figure 114. L'erreur moyenne commise sur l'ensemble des revêtements est égale à 0,7 dBA, à comparer à celle constatée avec l'enveloppement 2D de 1,0 dBA. L'écart pour les revêtements extrêmes (planches A' et ISO) est réduit comparé à celui constaté sur la Figure 103, graphe de droite.

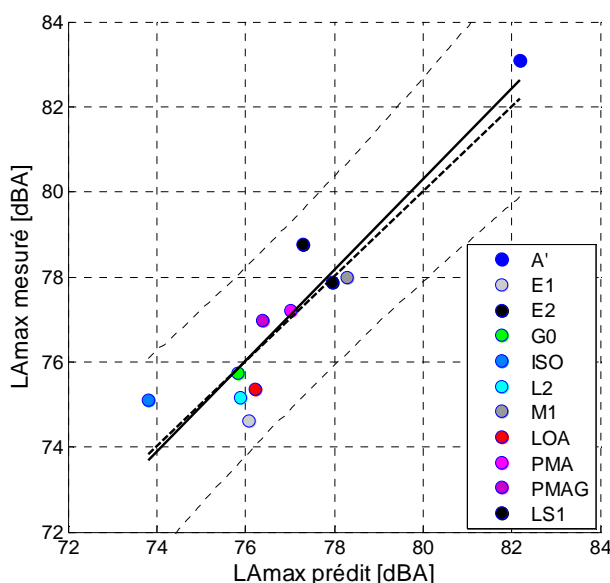


Figure 114 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux globaux au passage reconstruits à 90 km/h avec le pneumatique sculpté

La Figure 115 donne un aperçu de la correspondance modèle/mesure en termes de niveaux par bandes de tiers d'octave sur 6 des 11 revêtements utilisés pour la construction du modèle. Les écarts sont relativement faibles. On peut noter toutefois que pour la planche ISO, les niveaux en basses et moyennes fréquences sont sous-évalués ainsi que pour la planche A'. En hautes fréquences, les écarts les plus importants sont observés sur la planche LS1. Quant à la planche PMA, il semble que les faibles coefficients d'absorption mesurés sur cette planche (cf. paragraphe 4.1.3) n'aient pas d'incidence sur le bruit de roulement.

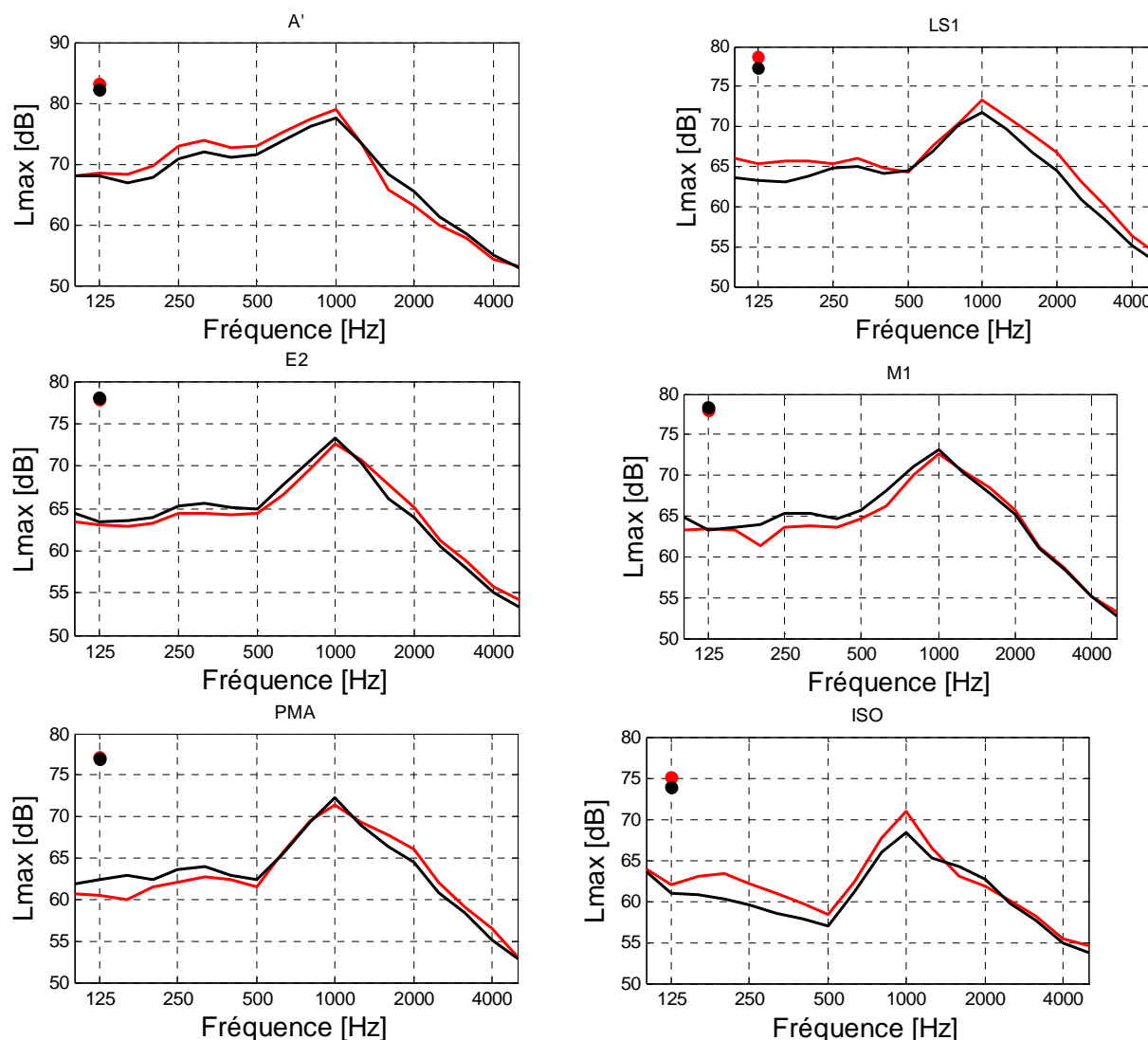


Figure 115 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux au passage par bandes de tiers d'octave à 90 km/h avec le pneumatique sculpté pour 6 des 11 revêtements utilisés pour construire le modèle – Niveaux mesurés en rouge- Niveaux prédits par le modèle en noir

4.2.4.3. Prédiction des niveaux de bruit de revêtements absorbants

Le modèle ainsi construit a été appliqué aux deux BBTM développés dans le cadre de la tâche 2. L'atténuation par effet de propagation telle que décrite en 4.2.1 a été évaluée à partir des paramètres identifiés sur la base des mesures d'absorption en incidence normale (cf Tableau 14). Elle est représentée Figure 116 pour les deux revêtements. L'atténuation ainsi calculée atteint presque 6 dB à 800 Hz pour le BBTM 0/6 et 7 dB à 1 kHz pour le BBTM 0/4.

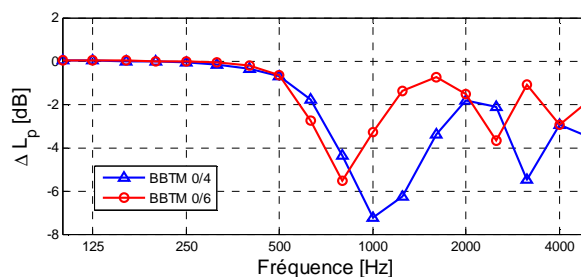


Figure 116 : Atténuation due à l'effet de propagation entre source et microphone calculée pour les BBTM 0/4 et 0/6 évalués dans le cadre de la tâche 2

La correspondance modèle/mesure en termes de niveaux de bruit au passage pour le pneumatique sculpté à 90 km/h est donnée Figure 117. Concernant le BBTM 0/4, si l'on ne prend pas en compte la correction d'absorption, la correspondance modèle/mesure est satisfaisant jusqu'à 1 kHz. Au-delà, des écarts importants sont observés. Le modèle surévalue dans ce cas le niveau global de 2,5 dBA. La prise en compte de l'effet d'absorption sur la propagation améliore légèrement la correspondance en hautes fréquences mais dégrade fortement le résultat autour de 800 Hz. Le modèle sous-évalue le niveau global de 1,7 dBA dans ce cas. Concernant le BBTM 0/6, la correspondance modèle/mesure en termes de niveaux en tiers d'octave est sensiblement meilleure que pour le BBTM 0/4. Les tendances de correction de l'effet d'absorption sont plus claires. Si l'on ne prend pas en compte l'effet d'absorption, le modèle surévalue fortement le niveau global (de 4,1 dBA). En prenant en compte son effet, l'écart est réduit à 1,9 dBA. L'effet d'absorption sur la propagation ne corrige pas suffisamment les niveaux entre 1 kHz et 1,6 kHz qui constituent les niveaux les plus élevés compte-tenu de la pondération A.

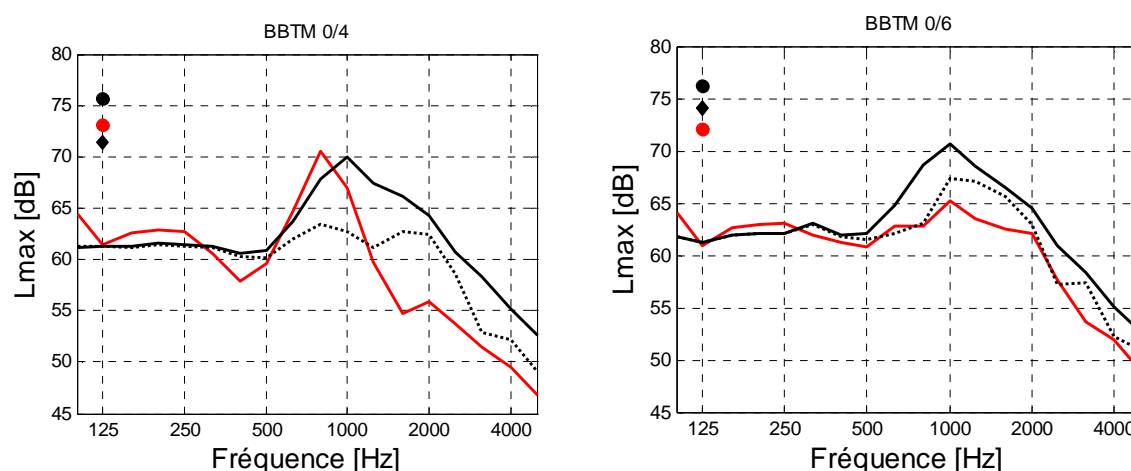


Figure 117 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux au passage par bandes de tiers d'octave à 90 km/h avec le pneumatique sculpté pour les BBTM 0/4 et BBTM 0/6 mesurés dans le cadre de la tâche 2 – Niveaux mesurés en rouge- Niveaux prédits par le modèle sans correction d'absorption en trait continu noir – Niveaux prédits avec correction d'absorption en trait tireté noir

4.2.5. Conclusion

La version bidimensionnelle du modèle HyRoNE a été reconstruite en utilisant les revêtements denses à texture conventionnelle de la base de données ODSurf. La difficulté d'intégrer dans le modèle des surfaces à rugosité peu marquée pour la prévision de bruit dans le cas d'un pneumatique standard a pu être mise en évidence.

Il a pu être montré également l'intérêt d'une information tridimensionnelle de la texture du revêtement de chaussée et des motifs du pneumatique pour prendre en compte l'effet de rugosité combinée pneumatique/revêtement pour la prévision des niveaux de bruit d'origine vibratoire. Une nouvelle procédure d'enveloppement tridimensionnel permettant de la prendre en compte a été développée. Elle pourra être comparée à d'autres approches basées sur des modèles de contact statiques ou dynamiques telles que l'approche multi-aspérités décrites en 4.3.

Le modèle a été testé sur deux revêtements de type BBTM présentant des textures peu agressives et des propriétés d'absorption. Une correction de l'effet d'absorption est apportée en considérant uniquement l'atténuation due à la propagation source/récepteur par rapport à un sol parfaitement réfléchissant. Pour l'un d'eux, les résultats sont médiocres et délicats à interpréter. Pour l'autre, la correction d'absorption améliore la prévision du niveau global sans toutefois atteindre la précision obtenue sur les revêtements denses conventionnels.

Le modèle HyRoNE dans sa version tridimensionnelle distingue encore deux domaines de fréquences, l'un associé à l'excitation vibratoire du pneumatique, l'autre associé aux phénomènes de pompage d'air. L'objectif à venir est de pouvoir considérer les contributions respectives de ces deux mécanismes sur

l'ensemble du domaine fréquentiel en essayant d'améliorer la prévision des niveaux de bruit dû au pompage d'air.

4.3. Approche physique pour la prévision du bruit

4.3.1. Partitionnement de surface de chaussée pour le contact pneumatique/chaussée (*en anglais*)

4.3.1.1. Introduction

Rolling noise is the main source of light vehicle noise after 50 km/h [30]. It is generated by several complex physical mechanisms, which are usually divided in two categories of sources [31], i.e. tyre vibration sources and aerodynamical sources in the vicinity of the contact area (often cited as "air-pumping"). These mechanisms are influenced by the dynamic contact interaction between the tyre and the road (Figure 118). Hence a detailed tyre/road contact model is needed for proper estimation of rolling noise.

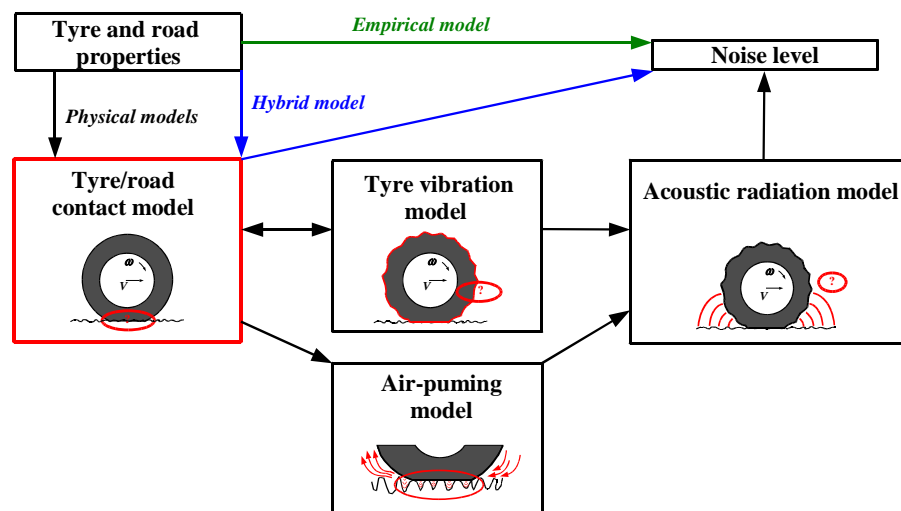


Figure 118 : Rolling noise is generated by complex physical mechanisms (from Dubois [32])

Several methods have already been developed to study the contact force distribution developing at the tyre/road interface during rolling. One of the key-issue is to have a good description of the road surface in the contact model. The random and multi-scale nature of the road surface is one of the difficulties, leading to a non-linear tyre/road contact problem. Thus Cesbron [33] developed a multi-asperity approach that is composed of two scales for contact calculation (Figure 119). The macroscale gives the contact force distribution at the tips of the road asperities and the microscale gives the local contact pressure distribution on each asperity. The macroscale calculation step is based on the relationship between the local contact force and the displacement at the tip of each asperity, also named contact law in the following.

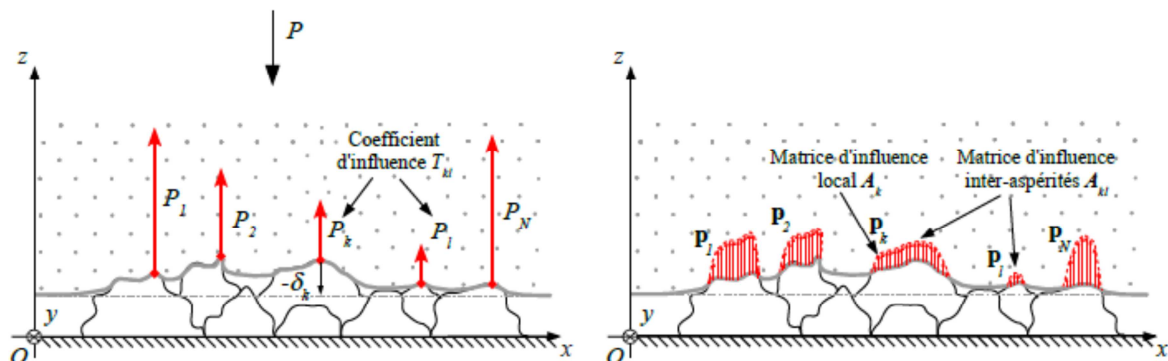


Figure 119 : Multi-asperity contact model: macroscale (left) and microscale (right) (from [32])

For simple geometries, such as spherical or conical shapes, the contact law can be obtained mathematically, leading to analytical description [34]. However, since road surfaces have random and irregular geometries, the contact laws on the asperities are calculated by means of a numerical model and can then be described by means of a general analytical function fitted on the numerical data [35]. The microscale calculation step is initialized from the contact force distribution and lead to the contact pressure distribution within the contact area. The multi-asperity model gives accurate results with considerable reduction of the calculation efforts, especially if the calculation is limited to the macroscale [35]. The approach allows the calculation of the contact stresses during rolling of a standard tyre on a real road surface [32]. By means of a hybrid statistical approach [36], it has been shown that the contact force significantly affects the estimation of rolling noise in the low frequency range, i.e. below 1000 Hz.

Considering the input data of the multi-asperity approach, the partitioning of road surfaces has to be improved. This step aims at the decomposition of the road surface into a set of asperities from 3D road texture measurements and subsequently estimate the contact law on each asperity (Figure 120). The present work focuses on the partitioning of road surfaces.

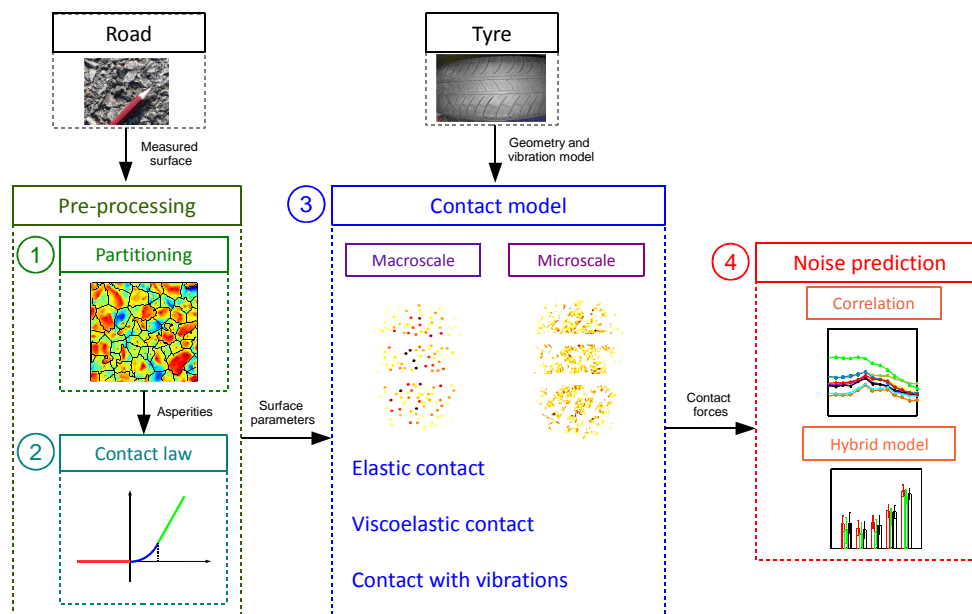


Figure 120 : Tyre/road contact modelling by means of a multi-asperity approach (adapted from [32]): the present study focuses on the partitioning of the road surface

4.3.1.2. Principle of road surface partitioning

As explained in the introduction, road texture plays a very important role in tyre/road contact interaction and resulting noise emission. Therefore, there is a need to properly describe the texture of the road surfaces in the contact calculations. This implies a proper identification of road surface asperities in the multi-asperity approach, by means of a partitioning algorithm. The efficiency of this algorithm is of great importance for a correct description of the input data in the contact model. The partitioning is based on segmentation algorithms developed in the field of image processing. Thus the measured 3D road texture is transformed into images to reach the partitioning of the surface. The accuracy of this step (with regards to aggregates geometry) will directly affect the next contact calculation.

As a starting step for partitioning (Figure 121), a numerical method based on iterative thresholding has already been proposed by Cesbron [33]. The idea is to detect the emerging regions that will potentially enter into contact with the tyre. Most of them are actually the highest points of the measured surface in the vicinity of the asperity peaks.

The iterative thresholding method depends on several parameters. The first are the maximal and minimal aggregate sizes, l_{\max} and l_{\min} respectively, which fix the dimension range of one asperity composing the road surface. The next are the corresponding maximal and minimal number of pixels composing one asperity, n_{\max} and n_{\min} respectively. Out of this range, a group of pixels will not be considered as an asperity. Besides, the memory capacity of computers should also be taken into account, especially for n_{\max} , which can lead to excessive calculation time for the contact if its value is too big. Starting from the top point of the road

surface, whose height is h_0 , and then layer by layer with a resolution of dh , the regions that meet all the conditions are regarded as potential contact areas which are denoted by 1 in the program. The other areas are denoted by 0. Using this procedure, the original 3D texture image is transformed into a binary image. Then the summits of all the potential contact areas are detected and denoted by z_b .

The iterative thresholding method performs efficiently and gives most of the information required in the multi-asperity approach. However, the method only keeps emerging surface areas and ignores other minor regions that may actually be in contact with the tyre in real situation. From previous experience with the multi-asperity contact model, this may cause divergence issues in the contact calculation [33].

Hence based on the results of iterative thresholding method, Dubois [32] further developed the segmentation tool in order to avoid this non-convergence problem. The main idea is to have the information of the full road surface. In other words, the whole road surface is partitioned into a set of asperities, as defined in the multi-asperity approach. The advanced principle is the use of the watershed segmentation algorithm [37], which has been widely used in computational engineering in order to treat geographic images and which algorithm has already been developed in several programming languages.

In order to apply the watershed method to the binary image obtained from the road surface, it is necessary to transform the binary image into a grey level image. This step is important to avoid a problem of over segmentation during the watershed algorithm. Therefore, the distance between each zero pixel and its nearest non-zero pixel is calculated from the binary image. Then a grey level image is obtained and represents the linear distance between pixels. Finally, applying the watershed method leads to the initial segmentation result, defining the initial contours of the asperities constitutive of the road surface.

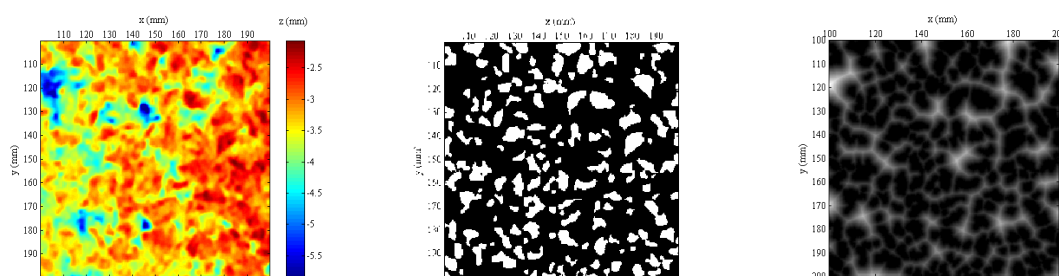


Figure 121 : 3D measured texture (left) of a dense asphalt concrete 0/10 and associated binary image (middle) and gray level image (right)

The gray level image is based on the distances between pixels. Therefore the contours of the asperities that have been computed by the watershed method may have some uncertainties. First of all, the pixels allocated to one asperity may actually belong to another asperity when looking at the topography of the road surface. This issue is due to the use of the distance between pixels as input for the watershed method: a pixel will be attributed to its nearest binary region, but may actually belong to another asperity. Secondly, after having the contours of the asperities, the summits z_k of the asperities are detected. These summits are needed for the contact calculation at the macroscale. Thus another problem can occur when the summit of an asperity is located on (or too close to) the contour of one of its neighbours. This may cause a problem of convergence in the contact calculation due to a singularity in the influence coefficient. Therefore, to improve the contours of asperities, correction steps are needed. These corrections will lead to segmentation results closer to the real distribution of asperities in the road surface and will avoid convergence issues during the contact calculation. The main process of partitioning of road surfaces is presented in Figure 122.

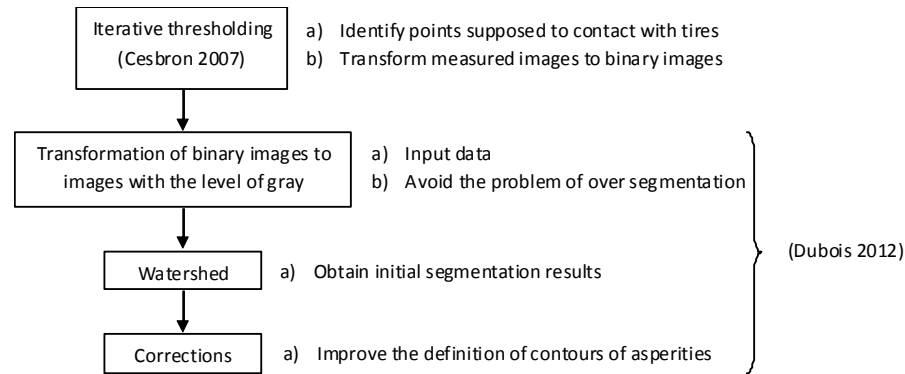


Figure 122 : Main steps for partitioning of a road surface

4.3.1.3. Numerical code for the partitioning of a road surface

Matlab® code versus Python™ code

The partitioning algorithm including watershed segmentation has been first developed and validated by Dubois [32] using a Matlab® code. As a main drawback, the watershed function included in Matlab® does not take into account the contour lines in the segmentation, which causes that all the contours of the asperities are labelled by 0 in the code. For instance, let's look at a sample area of a DAC 0/10 road surface, in Figure 123. After applying the Matlab® watershed algorithm, the initial segmentation is obtained with the summit of each asperity (Figure 123). However, looking into details in Figure 124 shows contours as empty lines between asperities, while they should actually belong to asperities.

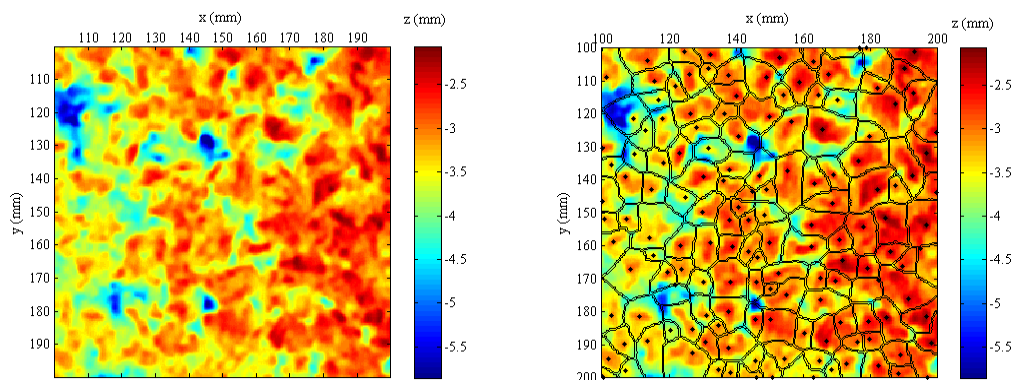


Figure 123 : 3D texture image of a sample area of surface E2 (left) and initial segmentation results after watershed algorithm (right) using Matlab® code

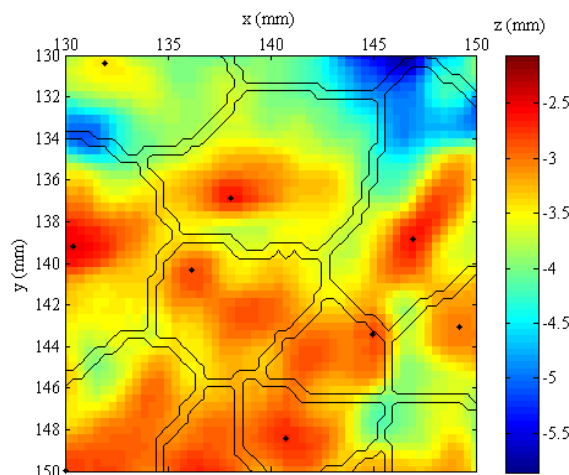


Figure 124 : Contours of asperities appearing as empty lines after using the Matlab® watershed algorithm

To solve this issue, the Voronoï algorithm applied to the summits of the asperities has been proposed by Dubois [32]. The Voronoï diagram of the road surface gives another segmentation including all pixels of the original image. Then, based on the pixels position, Dubois [32] combined the watershed with the Voronoï diagram and finally obtained a multi-asperity partition of the road surface including the contours of the asperities (Figure 125).

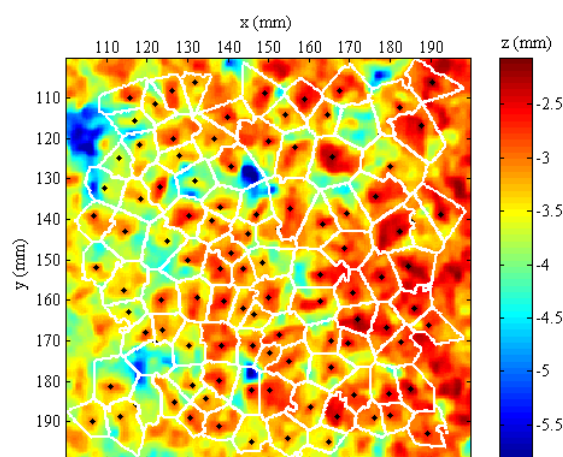


Figure 125 : Segmentation result obtained by combining watershed and Voronoï algorithms in Matlab®

A main drawback of this method is that Voronoï diagram creates new arbitrary contours (straight lines in Figure 125) which are not representative of the topography of the road surface. In other words, the partition combining Voronoï and watershed algorithms does not exactly corresponds to the original results of the iterative thresholding. In addition, those asperities do not exactly follow the real distribution and geometry of asperities of the road surface (some can be divided for instance). It is believed that this can bring disturbance into the contact calculation.

In the present work, a new numerical code is developed. It is also based on the watershed method but coded with Python™ language instead of Matlab®. Python™ is an open object-oriented language which on the one hand offers various libraries and on the other hand has been well developed and can easily be linked with other programming languages. In the new Python™ code, iterative thresholding and distance transformation from binary to gray level images are kept. The watershed algorithm in Python™ is still applied to the gray level image, but the function is such that the partitioning result directly integrates the contours of the asperities (Figure 126).

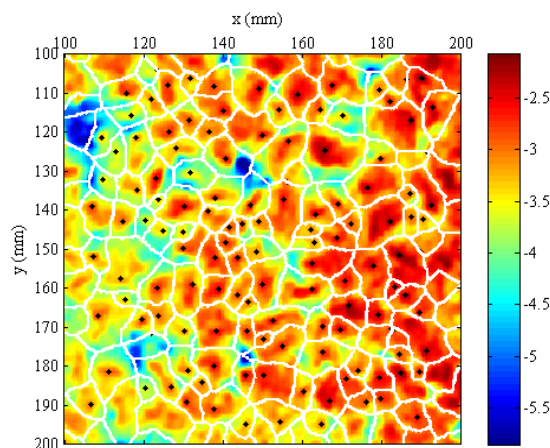


Figure 126 : Segmentation result by use of watershed algorithm of the Python™ code

Comparing Figures 125 and 126, it is obvious that Matlab® and Python™ codes give different initial segmentation, which will consequently result in different correction steps.

Python™ code

This section deals with the Python™ code in detail. Based on the partitioning principle, the Python™ code contains four main steps. The first step is the definition of input data. It includes the loading of measured 3D road texture, the spatial resolution dx and dy in the two horizontal directions and the vertical step dh which is used for iterative thresholding. In the present work, for the nine 3D road textures measured during the DEUFRAKO P2RN project (2006-2009), dx and dy are equal to 0,384 mm, which corresponds to the resolution of the measurement system. Textures were also measured during the ODSurf project with a new device having a higher spatial resolution of 0,1mm. However, this higher resolution leads to higher time consumption and huge memory resource. Thus it was decided to use dx and dy equal to 0,4mm to avoid these issues. The thresholding step dh was fixed to 0,01 mm for all the measured road textures.

The second and third steps in the partitioning code are iterative thresholding and watershed segmentation, which have already been described previously. At the end of the watershed step, the asperities located on the boundary of the measured texture are removed because they are considered as partial asperities and will not be considered for the contact calculation.

Finally, in the fourth and last step, corrections are applied to the remaining asperities. The main idea of this step is to eliminate two possible kinds of problems regarding contact mechanics (Figure 127). The first kind of problem, denoted as problem type 1, occurs when a summit z_k of an asperity obtained after watershed segmentation is different from the summit z_b of the potential contact area obtained by previous iterative thresholding. In terms of contact mechanics, z_b should be the highest point of the asperity. The second kind of problem, denoted as problem type 2, arises when the summit z_k is located on the contour of the asperity. This must be avoided to ensure the stability of the contact calculation. Combining problem types 1 and 2, there are four possible situations occurring during the correction step, as shown in Figure 127, where the first situation is the right one.

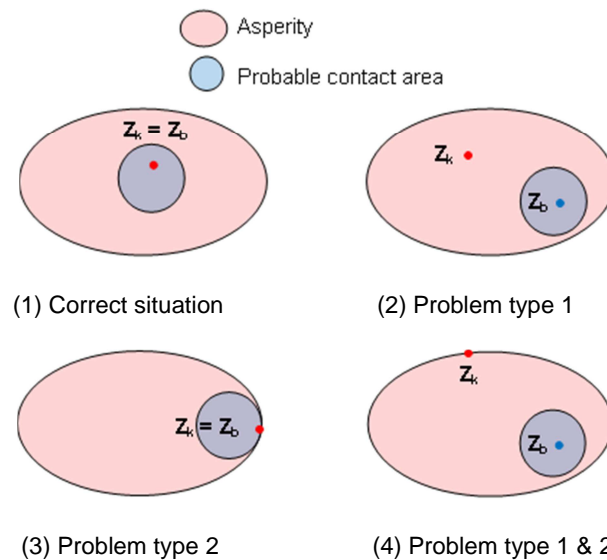


Figure 127 : Four possible situations occurring during the correction step: (1) well defined summit of the asperity in terms of contact calculation – $z_k = z_b$, (2) problem type 1 – z_k and z_b are different, (3) problem type 2 – $z_k = z_b$ but located on the contour of the asperity, (4) problem type 1 & 2 occurring simultaneously – z_k and z_b are different and z_k is located on the contour

In practice, the asperities needing corrections are identified. The index k as well as the summits z_k and z_b of the asperities are detected and the corrections are performed as described in the following. Considering problem type 1, the idea is to divide the problematic asperity into two new asperities: the first one having z_b as a summit and the second one having z_k as a summit (Figure 128(1)). The watershed method is used to separate the problematic asperity. The two new asperities have to meet situation (1) of Figure 127. One should pay attention to the fact that if z_k and z_b are too close, separation will lead to problem type 2 for the two new asperities, which will induce an infinite loop between problem type 1 and problem type 2 (Figure 128(2)). Hence, it is necessary to determine the distance between z_k and z_b before performing separation. Based on the multi-asperity approach and the resolution of the measured texture, it is considered that a distance of at least 5 pixels between z_k and z_b is required. Otherwise, if the distance is smaller, problem type 1 cannot be totally eliminated and is not treated.

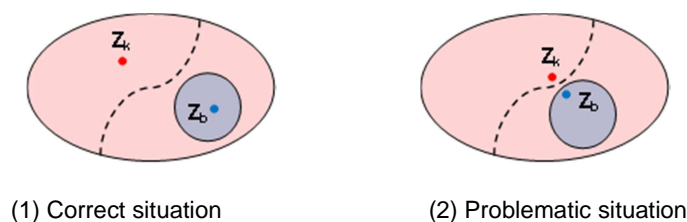


Figure 128 : Solution to deal with problem type 1: (1) the problematic asperity is divided into two new asperities using local watershed segmentation, (2) the problem is not treated if z_k and z_b are too close

Considering problem type 2, the idea is to find a neighbouring asperity and to take several pixels from this neighbour to change the contour of the asperity (Figure 129(1)). Several resultant situations have to be considered. First, the summit z'_k of the neighbouring asperity should not be too close to the pixels that will be taken. Otherwise, problem type 2 will occur in this neighbour (Figure 129(2)). Thus if no suitable neighbouring asperity can be found, the solution is to merge the problematic asperity with the neighbouring asperity. Next, the pixels that are assigned to the problematic asperity should not contain points that are higher than the summit z_k of the asperity. Otherwise the summit of the corrected asperity will become a point located on the boundary (Figure 129(3)), leading to problem type 2 again. In this case, more pixels are taken from the neighbour until problem type 2 can be solved. The asperities are merged if z'_k is finally too close to the boundary. Note that in this case, problem type 1 will occur in the new asperity.

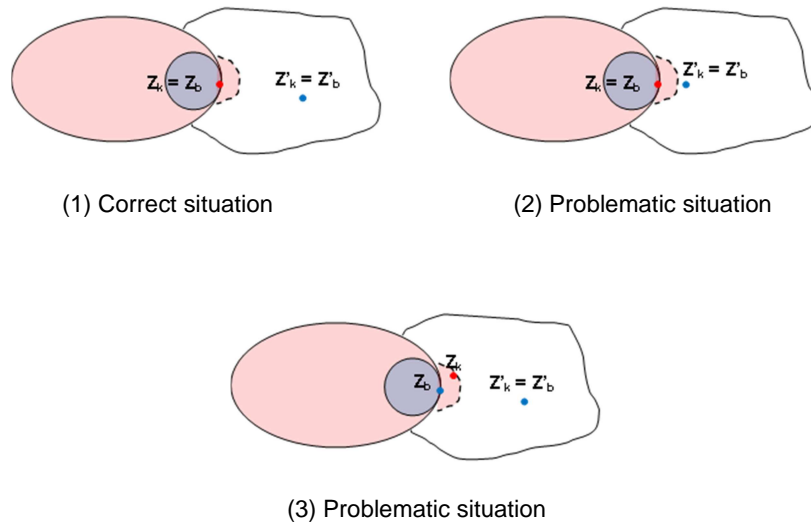


Figure 129 : Solution to deal with problem type 2: (1) the problematic asperity merges with some pixels of a neighbouring asperity to remove the summit from the contour, (2) if z'_k is too close to the contour, both asperities are merged, (3) merging with neighbouring pixels leads to a new summit located on the contour, the asperities must be merged, leading to problem 1

We now consider problem types 1 and 2 appearing simultaneously (Figure 130). In this case, the problematic asperity is treated as for problem type 2. z_k and an area around is merged with a neighbouring asperity until z_k is equal to z_b . Care should be taken on the fact that the merged area should not contain pixels higher than the summit z'_k of the neighbouring asperity. Otherwise problem type 1 and 2 will occur in the neighbour.

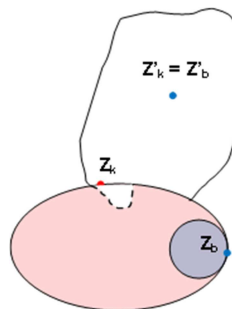


Figure 130 : Solution to deal with problem type 1 and 2 appearing simultaneously

After the correction steps, the final partitioning of the road surface is obtained. Looking at the example for a DAC 0/10 (Figure 131), it can be observed that the multi-asperity surface given by the Matlab® code is acceptable, but in comparison the result obtained with the Python™ code better respects the actual geometry of the road surface, i.e. the topographic contours of the asperities.

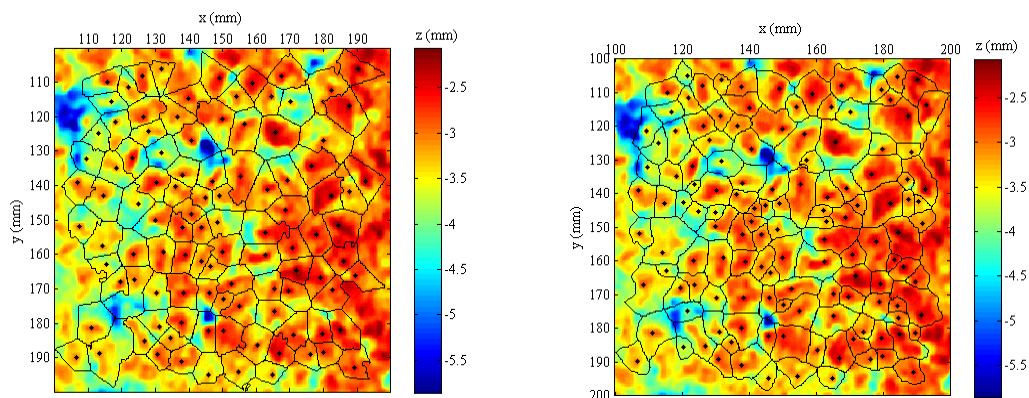


Figure 131 : Final partitioning for a DAC 0/10 road surface: Matlab® code result (left) and Python™ code result (right)

In addition, Python™ language developed in C/C++ is much more efficient than Matlab® language based on Java. It is still possible to improve the calculation time, especially when doing the partitioning of a road surface composed of smaller asperities. For instance, partitioning time has been compared for the two languages in the case of a VTAC 0/6 road surface within a total area of 2 m by 0.36 m. The computer has two CPU of 2GHz and a RAM of 6 Go. Python™ code took 56 hours while Matlab® code took 98 hours, which means that Python™ code reduces by almost half the computational effort.

4.3.1.4. Partitioning results for real road surfaces

Road surfaces and 3D texture measurements

In this part, the application of our Python™ code to some real road surfaces is presented. Ten reference roads surfaces have been considered in our study. Their names and photos are listed in Table 29.

Table 29 : Ten road surfaces studied in the present work

A : BBDR 0/6		G0 : BBS 0/10	
A' : ES 8/10		ISO : BBSG 0/8	
E1 : BBSG 0/10		L2 : SE 0/4	
E2 : BBSG 0/10		M1 : BBTM 0/10	
F : Colgrip 1.5/3		M2 : BBTM 0/6	

First, 3D texture measurements of nine road surfaces (the ISO surface was built in 2012), were measured in 2009 by BAST during the previous Deufrako P2RN project (Figures 132 to 140). The measurement parameters of the texture are listed in Table 30. These surfaces were used in [32] for contact calculation and will be used here for the validation of the new partitioning code.

Table 30 : Numerical parameters of the 3D texture measurements during the P2RN project

Pixel size (mm²)	Surface size (m²)	Resolution in the vertical direction, h_z (mm)
0.384 x 0.384	2 x 0.36	0.038

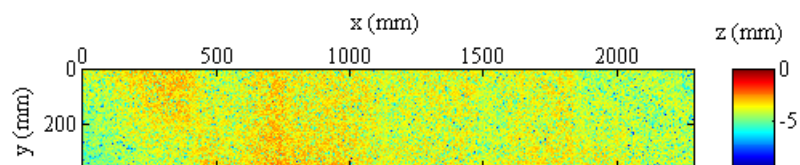


Figure 132 : 3D texture of road surface A (BBDR 0/6)

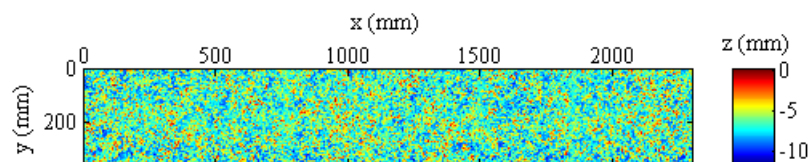


Figure 133 : 3D texture of road surface A' (ES 8/10)

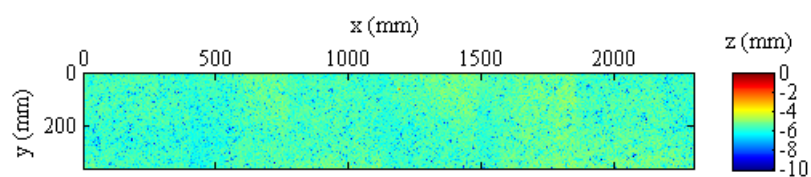


Figure 134 : 3D texture of road surface E1 (BBSG 0/10)

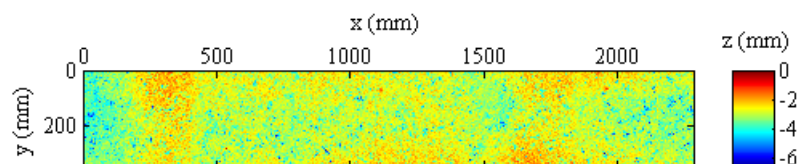


Figure 135 : 3D texture of road surface E2 (BBSG 0/10)

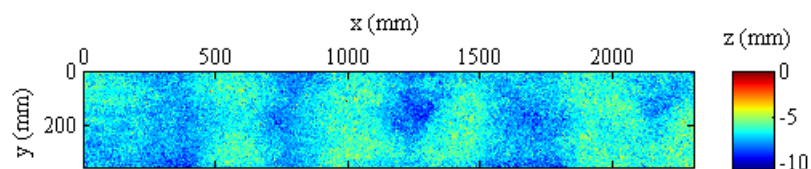


Figure 136 : 3D texture of road surface F (Colgrip 1.5/3)

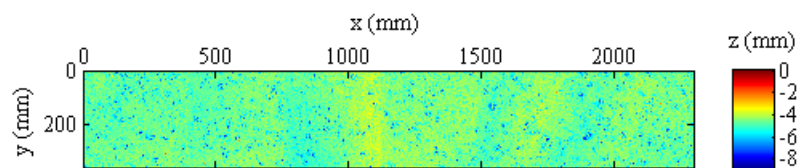


Figure 137 : 3D texture of road surface G0 (BBS 0/10)

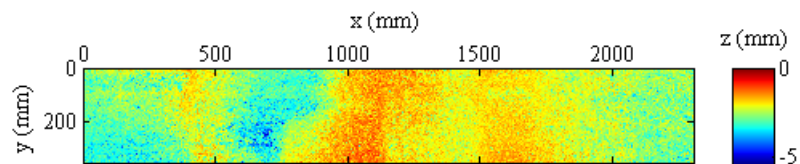


Figure 138 : 3D texture of road surface L2 (SE 0/4)

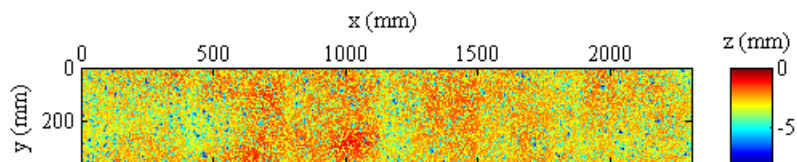


Figure 139 : 3D texture of road surface M1 (BBTM 0/10)

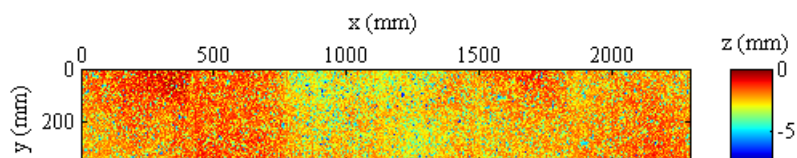


Figure 140 : 3D texture of road surface M2 (BBTM 0/6)

Secondly, a new 3D texture measurement system has been developed by Ifsttar during the ODSurf project (Figure 141). The 3D texture of nine road surfaces (surface F is missing), was measured in spring 2013 and are presented in Figures 142 to 150. With the new measurement system, the horizontal spatial resolution (i.e. pixel size of the image texture) is 0.1 mm by 0.1 mm. However, for partitioning of the surfaces the resolution is degraded to 0.4 mm by 0.4 mm. This was needed to avoid huge computational time. The measurement parameters of the texture are listed in Table 31. With the new system, the texture measurements have been extended to about 6 m along the driving direction, except for road surfaces G0 and M1 which were measured only on about 3 meters due to limited time for *in situ* tests.



Figure 141 : New 3D texture measurement system developed at Ifsttar

Table 31 : Spatial parameters of the 3D texture used for partitioning

Pixel size (mm ²)	Surface size (m ²)	Vertical resolution (mm)
0.402 x 0.402	A, A', E1, E2, ISO, L2, M2: 5.8 x 0.35 G0, M1: 3.0 x 0.35	0.01

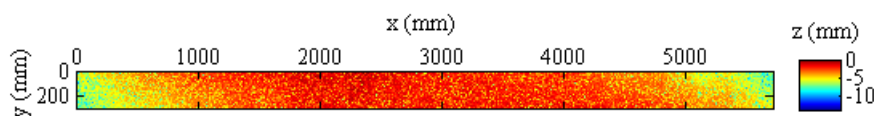


Figure 142 : New 3D texture of road surface A (BBDR 0/6)

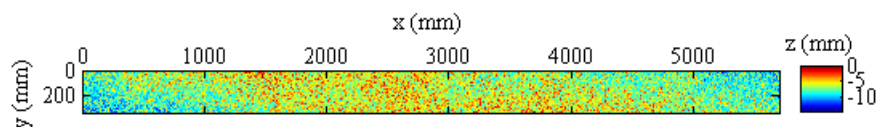


Figure 143 : New 3D texture of road surface A' (ES 8/10)

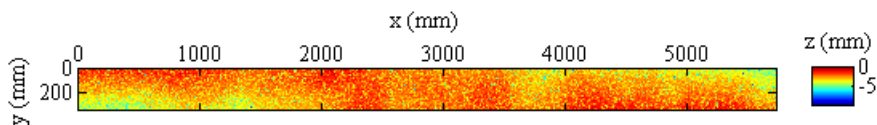


Figure 144 : New 3D texture of road surface E1 (BBSG 0/10)

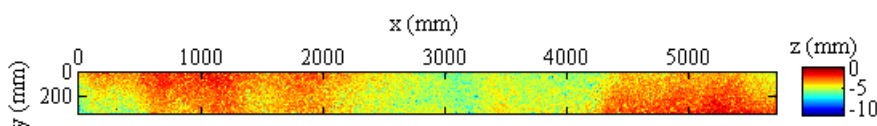


Figure 145 : New 3D texture of road surface E2 (BBSG 0/10)

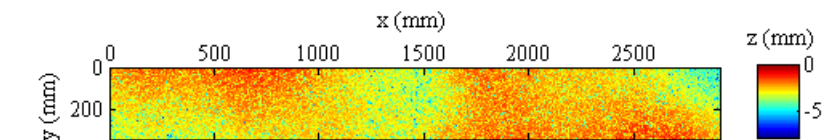


Figure 146 : New 3D texture of road surface G0 (BBS 0/10)

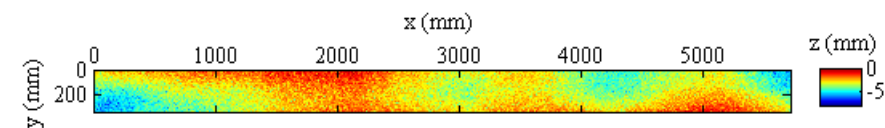


Figure 147 : New 3D texture of road surface L2 (SE 0/4)

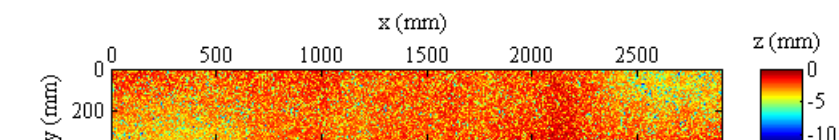


Figure 148 : New 3D texture of road surface M1 (BBTM 0/10)

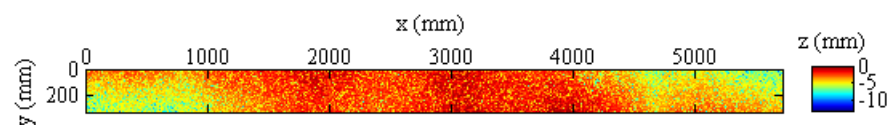


Figure 149 : New 3D texture of road surface M2 (BBTM 0/6)

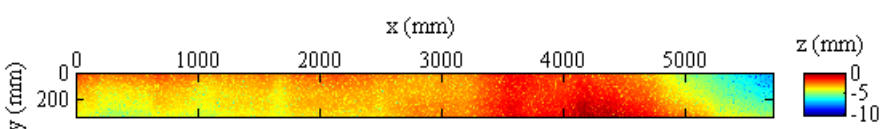


Figure 150 : New 3D texture of road surface ISO (BBSG 0/8)

Partitioning results for surfaces of the previous DEUFRAKO P2RN project

Partitioning of the nine surfaces measured during the previous P2RN project is obtained using the Python™ code along the whole surface. For the sake of visibility, the results are presented here for a small sample of size 100 mm by 100 mm. The results for the nine sample zones are shown in Figure 151 to Figure 159.

Partitioning of road surfaces is more efficient on surfaces having large aggregates, because in that case the topography in the image is much more pronounced and the contours between asperities are identified better using the watershed method. Thus, the Python™ code gives a really good partitioning for these surfaces having large aggregates, such as A' and E2. However, for surfaces having smaller aggregates, such as F and L2, or less pronounced topography, such as E1, the new code gives satisfying partitioning as well, showing the efficiency of the developed algorithm.

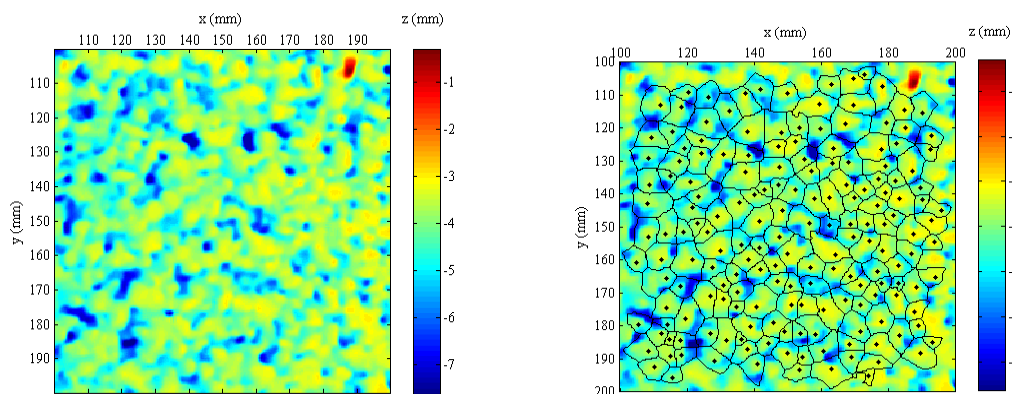


Figure 151 : 3D texture of a sample zone of surface A (left) and partitioning result (right)

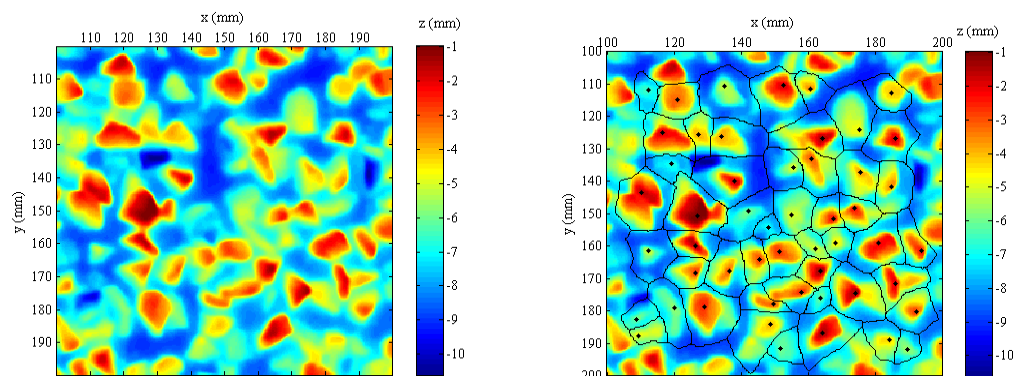


Figure 152 : 3D texture of a sample zone of surface A' (left) and partitioning result (right)

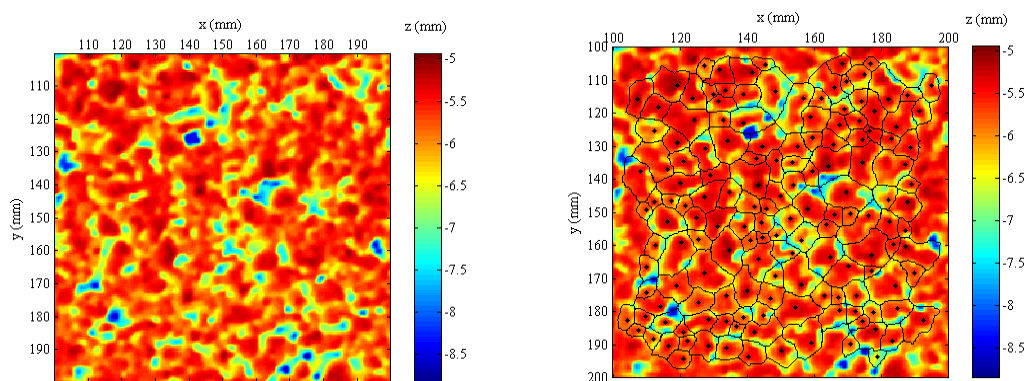


Figure 153 : 3D texture of a sample zone of surface E1 (left) and partitioning result (right)

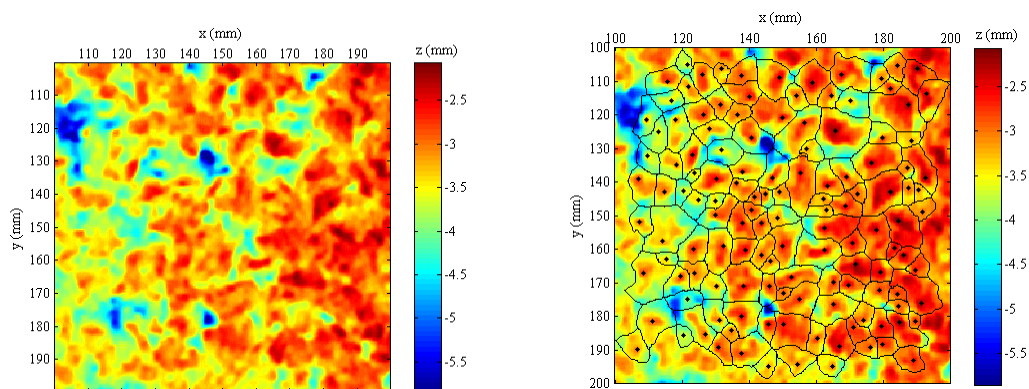


Figure 154 : 3D texture of a sample zone of surface E2 (left) and partitioning result (right)

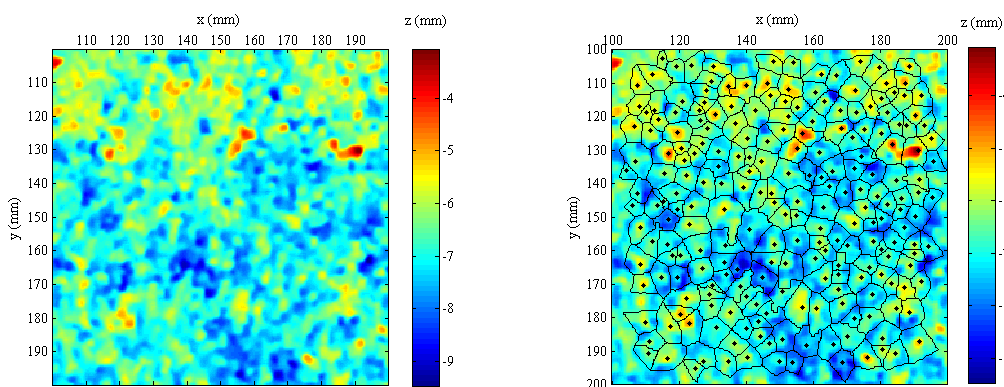


Figure 155 : 3D texture of a sample zone of surface F (left) and partitioning result (right)

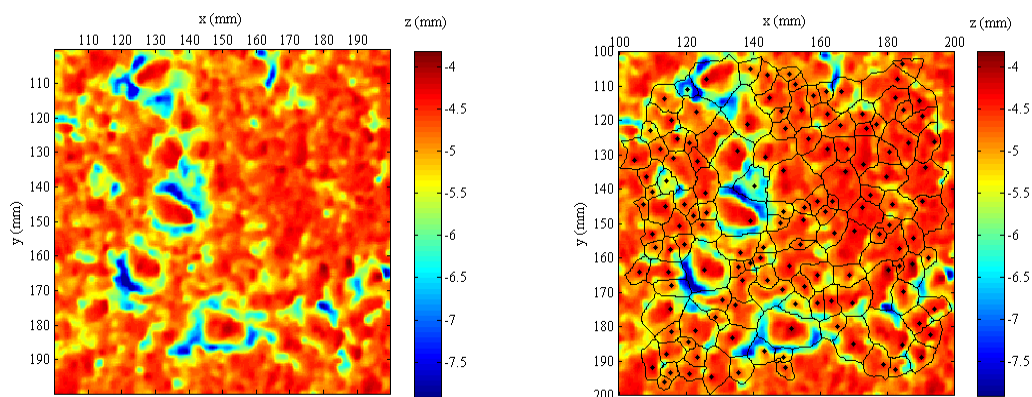


Figure 156 : 3D texture of a sample zone of surface G0 (left) and partitioning result (right)

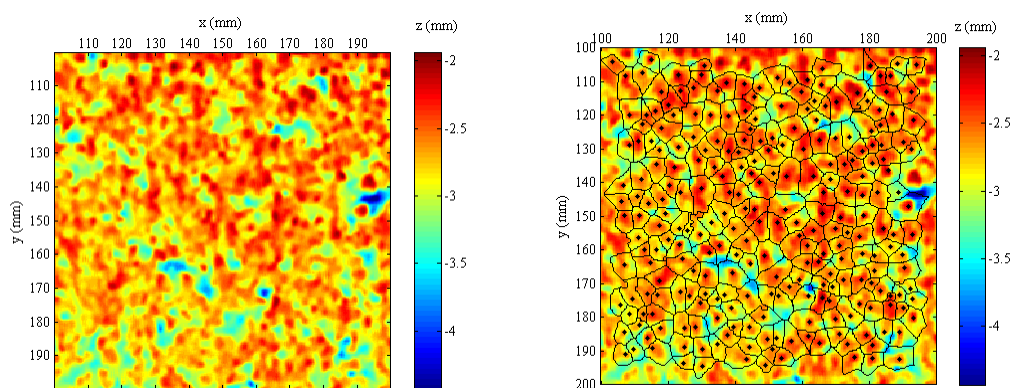


Figure 157 : 3D texture of a sample zone of surface L2 (left) and partitioning result (right)

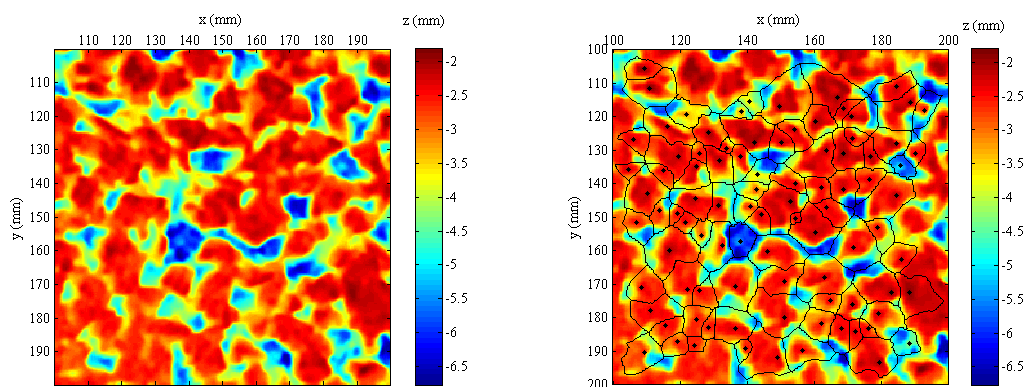


Figure 158 : 3D texture of a sample zone of surface M1 (left) and partitioning result (right)

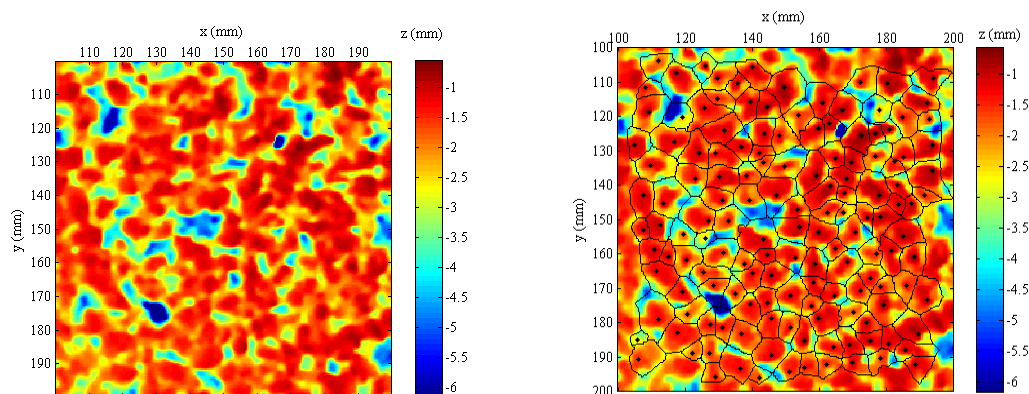


Figure 159 : 3D texture of sample zone of surface M2 (left) and partitioning result (right)

Partitioning results for surfaces of the ODSurf project

Secondly, the Python™ code was applied to partition the nine surfaces measured in 2013. Here the partitioning was only performed on a small sample of 100 mm by 100 mm. The calculation on the whole surface, which is quite time-consuming, will be performed in the future. The results for the nine sample zones are shown in Figure 160 to Figure 168. The Python™ code gives good partitioning results for all road surfaces, but road surface ISO for which it is very hard to figure out problem type 2, as shown in Figure 169. In this figure, two remaining asperities with problem type 2 can be noticed in the sample zone. This is due to the high flatness of ISO surface leading to difficulties to identify asperities.

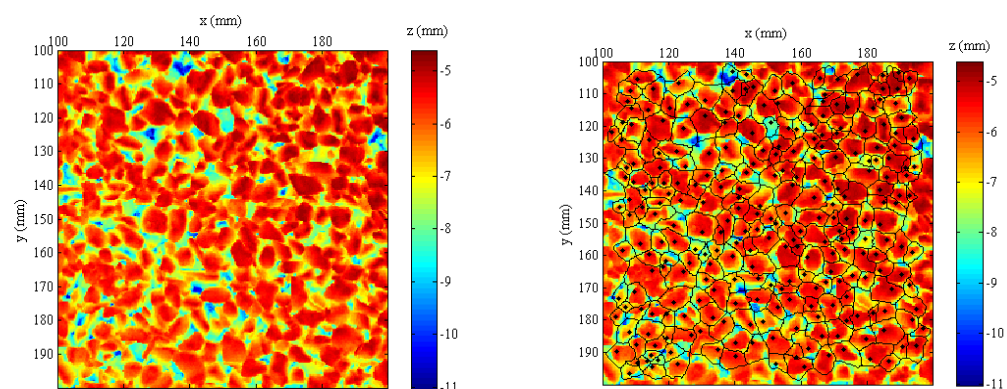


Figure 160 : New 3D texture of a sample zone of surface A (left) and partitioning result (right)

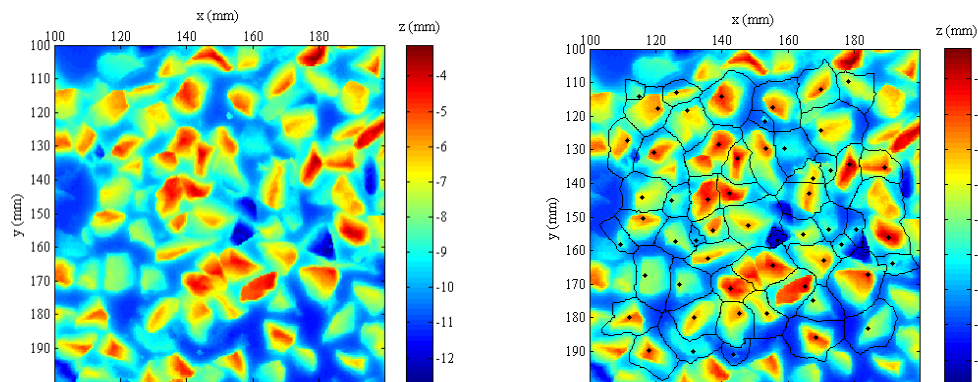


Figure 161 : New 3D texture of a sample zone of surface A' (left) and partitioning result (right)

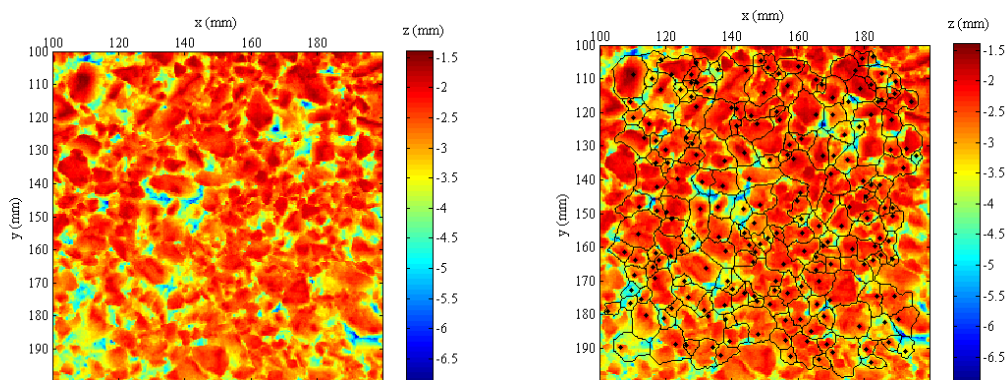


Figure 162 : New 3D texture of a sample zone of surface E1 (left) and partitioning result (right)

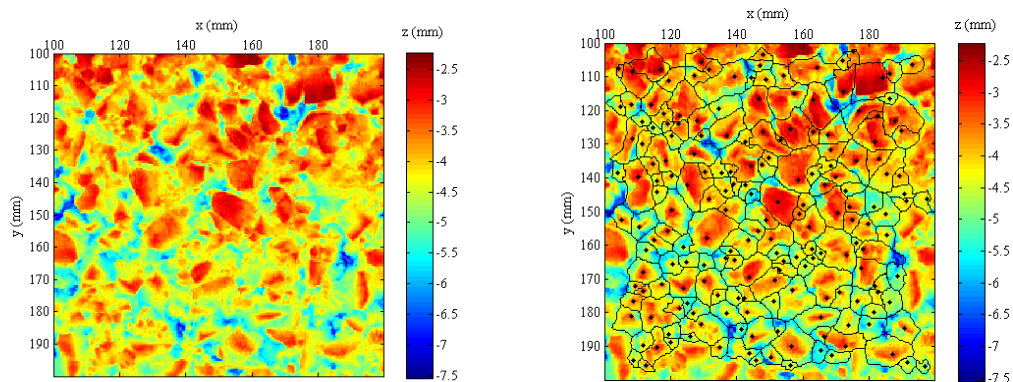


Figure 163 : New 3D texture of a sample zone of surface E2 (left) and partitioning result (right)

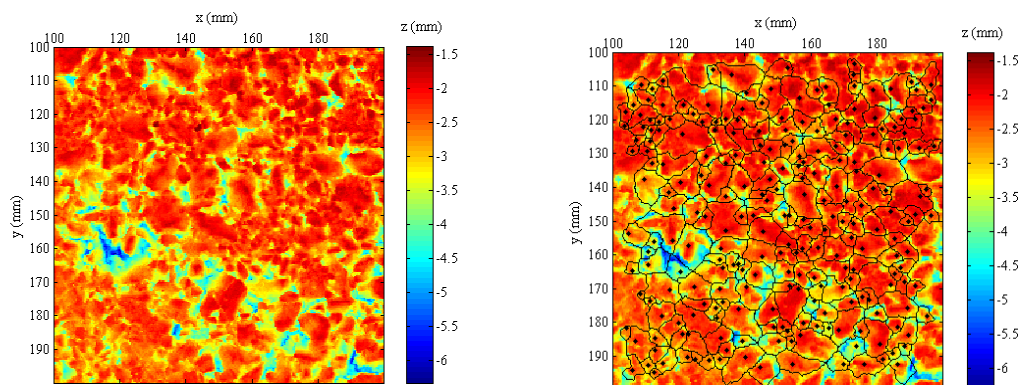


Figure 164 : New 3D texture of a sample zone of surface G0 (left) and partitioning result (right)

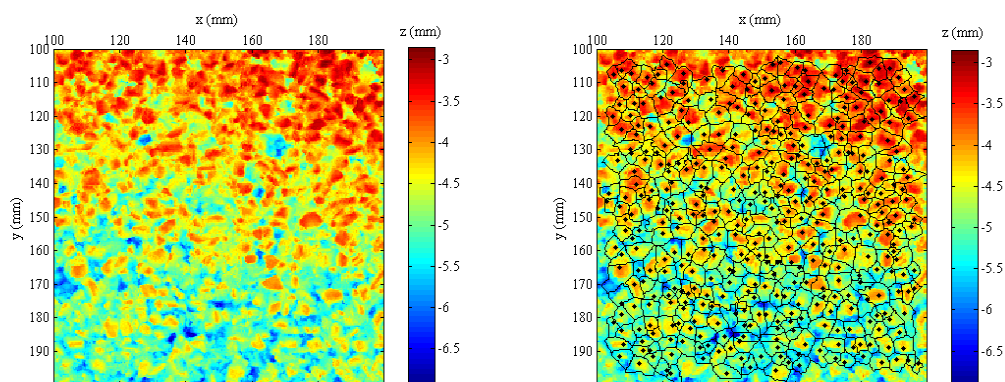


Figure 165 : 3D texture of a sample zone of surface L2 (left) and partitioning result (right)

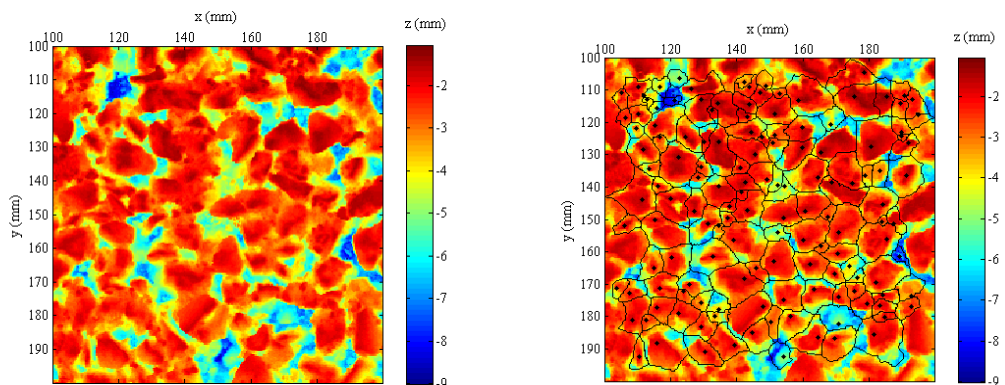


Figure 166 : 3D texture of a sample zone of surface M1 (left) and partitioning result (right)

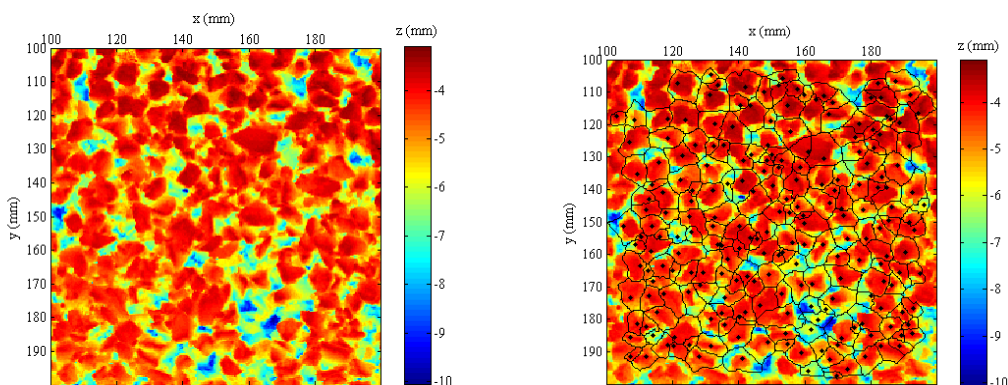


Figure 167 : 3D texture of a sample zone of surface M2 (left) and partitioning result (right)

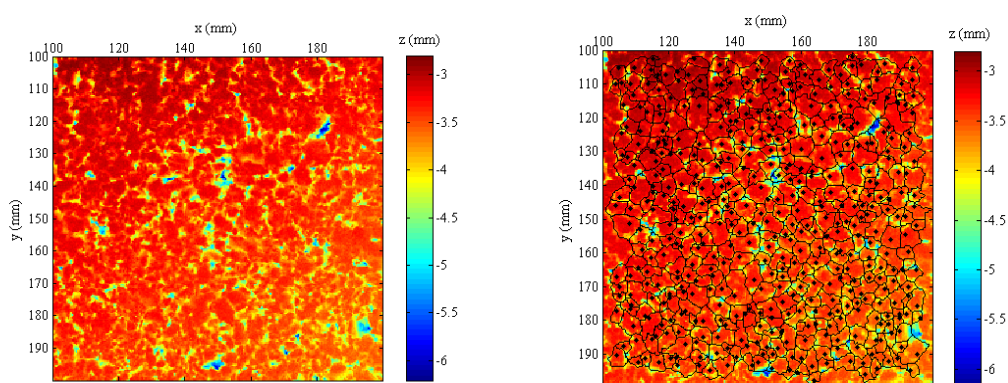


Figure 168 : New 3D texture of a sample zone of surface ISO (left) and partitioning result (right)

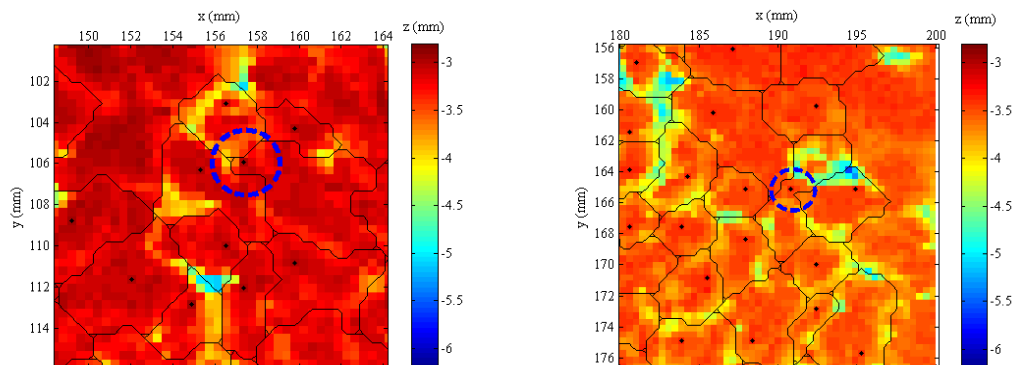


Figure 169 : Two remaining asperities with problem type 2 in the sample zone of surface ISO

4.3.1.5. Conclusions

In the present work, a new Python™ code has been developed to partition a road surface into a set of asperities. This new code uses a Python™ library for watershed, which includes the frontiers between asperities in the segmentation and consequently avoid the combination with a Voronoï diagram as proposed before in [32]. Two types of problems have been identified to figure out potential issues occurring on the asperities after the watershed segmentation. These are treated in the algorithm in the final correction step. It has been shown that, compared to the Matlab® code, the Python code gives a partitioning more representative of the actual topography of the road surface. A reduction of the computational time was also observed with the new program, with about half of the time saved.

The algorithm has been validated for nine reference road surfaces that were measured in 2009 during the P2RN project. The partitioning of a sample zone of 100mm by 100mm has been presented for all surfaces. It was found out that the new Python™ code gives satisfying results for the different kind of surfaces. Then, the Python™ code has been tested for nine surfaces measured in 2013 using a new device. Here again the code gives satisfying results for eight road surfaces, except for the extremely flat ISO surface with no well pronounced asperities.

4.3.2. Comparaison des divers modèles de pneumatique pour des applications au bruit de roulement (en anglais)

In order to study the vibration properties of a tyre, various models have been presented in literature. The main purpose of the current study is a brief review of the characteristics of some models as the single degree of freedom (SDOF) system, circular ring, orthotropic plate and full/periodic 3-dimensional (3D) models. Each of these types of models has some advantages and disadvantages. The SDOF models are simpler mathematically but they involve approximate solutions, while the circular ring and orthotropic plate models involve simpler geometrical models which are solved more rigorously. 3D models, based mainly on the finite element method, can account more precisely for the structural features of tyres, but usually they are more expensive. The dynamic behavior of these models are studied and compared with each other. The study of vibrational responses demonstrates that the validity of each model is limited to a certain frequency range. To employ the circular ring and orthotropic plate models, first, it is necessary to estimate some structural and material data associated to the nature of these models. To this end, the vibrational response of a 3D model is considered to determine some properties such as the radial and tangential stiffnesses in circular ring model or the bending and foundation stiffnesses and tension in the orthotropic plate model. Furthermore, the effects of inflation pressure and the tread patterns on the dynamic behavior of the mentioned models are examined. For verification, the dynamical behavior of the tyre is studied experimentally.

4.3.2.1. Introduction

A lot of research on the vibration properties of vehicle tyres has been done during the last decades. In this purpose, one of the simplest method is the model of a rotating ring on an elastic foundation. Due to the completeness and simplicity, since the 1960s, this method has drawn the attractions of numerous

researchers. The development of the method is pioneered by Clark [38], Tielking [39] and Bohm [40] who presented a method for calculating the dynamic behavior of a loaded pneumatic tyre modeled as an elastically supported cylindrical shell. In these works, the tyre sidewall effects were modeled by the radial springs. Pacejka [41] modeled the tyre as a circular ring under pressure. By considering the circumferential springs for the elastic foundation, he developed models for the lateral vibration. The effect of structural damping on the study of the dynamic response of the classical ring on the foundation was considered for the first time by Padovan [42] in 1976. Later, Potts et al. [43] studied the vibration of a rotating ring on an elastic foundation in terms of the material and geometric properties of the tyre. In order to study the free vibration of a circular ring tyre located on an elastic foundation, a finite element method was presented by Kung et al. [44] in 1987. Huang and Soedel [45] and Huang [46] studied the response of a rotating ring subjected to harmonic and periodic loadings. In 2008, Wei [47] proposed an analytical approach to analyze the forced transient response of the tyres based on the ring on the elastic foundation. The next method to model the tyre structure is the model of Timoshenko beam. Pinnington and Briscoe [48] modeled the tyre belt based on the tensioned Timoshenko beam in order to derive arbitrary sidewall impedances. They developed a one-dimensional wave model to describe the tyre dynamics. The waves, which propagate along the tyre, take shear and rotational effects into account. Recently, Vu et al. [49] presented a circular beam model based on the timoshenko beam theory to study the dynamic behavior of the tyre around its linear/nonlinear state. The validity of the circular ring models is limited to frequencies less than 400Hz, when the wavelength is large enough compared to the width of the tyre.

In order to study the vibrational tyre properties in higher frequencies, in 1989 Kropp [50] proposed the orthotropic plate model on a Winkler foundation, where the tyre belt is modeled as a finite plate which has different tangential and lateral properties. The foundation represents the effect of sidewalls as well as the inflation pressure. Also, the external tension forces due to the inflation pressure are considered in this model. In 2001, Hamet [51] proposed an analytical approach to study the impulse response of a tyre modeled by a thin orthotropic plate under tension supported by an elastic foundation. Later, Larson and Kropp [52] developed a double-layer tyre model including the tangential motion and the local deformation of the tread. Their model is appropriate for the modeling of radial and tangential vibrations at the high-frequency range. However, the model of the orthotropic plate is completely dependent on the results of experiments. In order to estimate the structural properties of the orthotropic plate tyre model, Perisse et al. [53] presented a procedure for the experimental modal testing of a smooth tyre in low and medium frequencies.

However, applying finite element (FE) approaches, one can model more accurately the structural features of a tyre. Thus, especially during the past decade, a considerable number of studies have been focused to investigate the wave propagation in a symmetrical periodic element of a tyre based on FE techniques. Brillouin [54] and Mead [55] applied the Floquet's principle or the transfer matrix to study the wave propagation in a 3-dimensional (3D) periodic structure. In 2005, Houillon et al. [56] and Mace et al. [57] developed a FE method to determine the propagation constants and wave modes. Their works were focused on obtaining dispersion relations and their application in energetic methods. Recently, Duhamel et al. [58] employed a similar method to calculate point force responses. Their approach was called the Waveguide Finite Element (WFE). Furthermore, this technique was applied by Waki et al. [59] to predict the free wave propagation and the forced response of a tyre. The results obtained by using WFE methods are similar to those obtained with the classical FE approach. But, the computational cost of the WFE method is very low compared to the usual FE. To this end, one can easily use this model to analyze structures with complex geometries and material distributions. In addition, applying a reduction technique, the number of degree of freedom (DOF) in a periodic element can be greatly reduced so that it can significantly shorten the computation time.

In the current work, we mainly review the above mentioned models of tyre with a focus on their vibrational response. For this purpose, we calculate the dynamic behavior of these models, discuss their assumptions and limitations, and compare their results with the experimental results. In case studies, the effects of inflation pressure in tyre is studied. In order to verify the results given by the periodic 3D model, a full 3D tyre model is analyzed numerically via a FE technique.

4.3.2.2. Brief review on tyre models

In this section, we summarize the existing models of tyre proposed in literature and discuss the assumptions, limitations, and drawbacks of each model. The models can be classified into seven categories; simple model based on a single degree of freedom (SDOF) system, rotating ring model, Timoshenko circular beam model, orthotropic plate model, periodic 3D model, full 3D model, and experimental model.

4.3.2.2.1 Single Degree of Freedom (SDOF) System

Figure 170 shows the basic model for the SDOF system. This model consists of a concentrated mass, M , attached to a spring with stiffness K and a viscous dashpot, C . $F(t)$ and $u(t)$ are general time-varying force and displacement responses. Considering an excitation of the form $f(t) = \text{Re}(fe^{i\omega t})$, and a solution of the form $u(t) = \text{Re}(ue^{i\omega t})$, the equation of motion can be rewritten as [60].

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)u = f \quad (15)$$

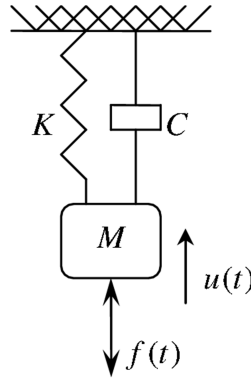


Figure 170 : Single Degree of Freedom System

As it is observed, mathematically, this model is very simple. For the tyre model, M presents the mass of the tyre and the stiffness and inflation in the tyre are considered by K . As expected, the results obtained by this model are not as accurate as for the other models. The SDOF model of tyre can be utilized in fundamental studies.

4.3.2.2.2 Rotating Ring Model

The rotating ring model is one of the simplest methods used to model a tyre. In this model, it is supposed that the automobile tyre is composed of two main parts; the belt band (tread) and the sidewalls. Based on the inflation pressure of the tyre, the sidewall may provide three ways (radial, tangential, and lateral) elastic foundation for the belt. Here, the tread is modeled as a rotating ring and the elastic properties of sidewall are modeled by the distributed springs, k_r and k_θ in radial and circumferential directions, respectively, i.e. the lateral stiffness is ignored (Figure 171).

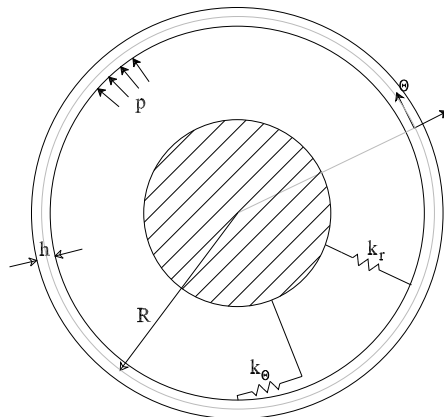


Figure 171 : Circular ring model

4.3.2.2.3 Timoshenko Circular Beam Model

In the Timoshenko circular beam model, the belt is modeled as a Timoshenko beam to accommodate bending, shear, and the rotary inertia effects that are significant at high frequencies. Similar to the circular ring model presented in the previous section, the sidewall of the tyre is replaced by the radial and tangential springs, k_r and k_θ .

4.3.2.2.4 Orthotropic Plate Model

In this model, the tyre is simulated by the three dimensional plate as the tyre belt, which has different tangential and lateral properties, and the sidewalls modeled by a thin plate under tension on an elastic foundation (due to the inflation in the tyre), Figure 172.

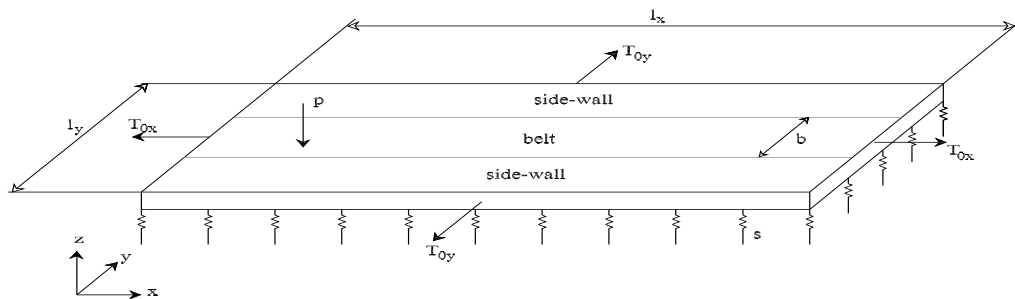


Figure 172 : Orthotropic plate model

4.3.2.2.5 Periodic 3D Model

A symmetrical periodic element of the tyre, as shown in Figure 173, is considered. The equation for a time harmonic motion of a periodic section can be written as

$$Du=q, \quad (16)$$

where, $D=K+i\omega C-\omega^2 M$, is the dynamic stiffness matrix, u and q denote nodal DoFs and force vector, respectively. K , C , and M are stiffness, viscous damping and mass matrices which are obtained from conventional FE methods. Using results from the periodic structure theory a response of the whole structure can be obtained from computations on a single period see [57] and [58].

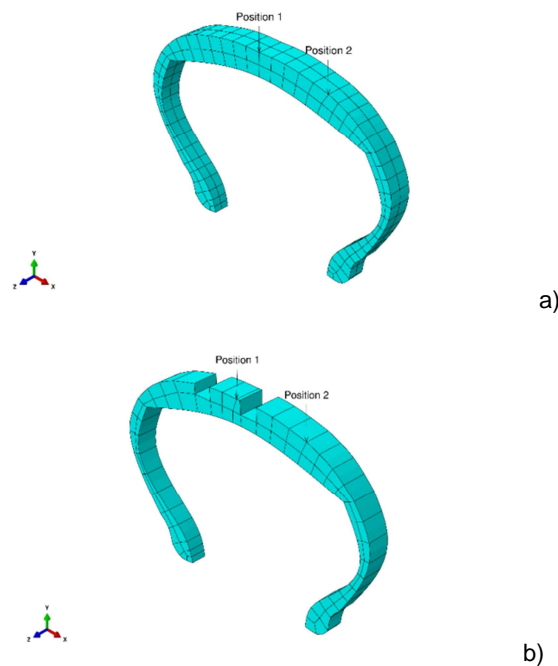


Figure 173 : Symmetrical periodic element of a tyre

4.3.2.2.6 Full 3D Model

Figure 174 displays a full 3-dimensional model of tyre considered in this study. This model is devoted solely to the verification of the results obtained by the periodic 3D model. For this purpose, the tyre is analyzed numerically by the finite element techniques. Abaqus software is applied to model and analyze the tyre.

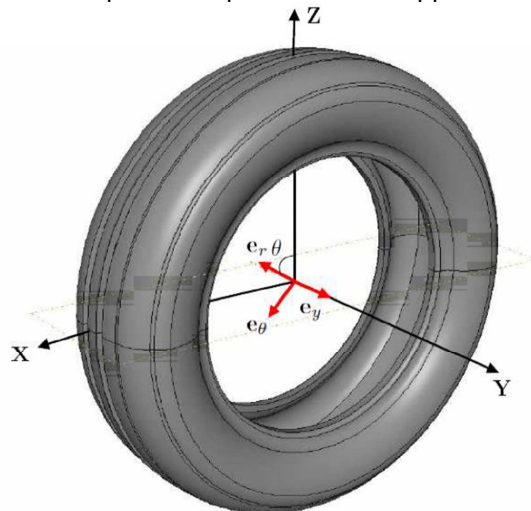


Figure 174 : Full 3D model

4.3.2.2.7 Experimental results

Finally, the vibration of the tyre is studied experimentally. The type of tyre used in this experiment is Michelin 165/70R13. The inflation pressure of the tyre is about 2 bars. Figure 175 shows a schematic of the experiment setup. As it is seen, a freely suspended tyre mounted on a steel rim is taken into account. To apply a random excitation force to the tyre, an electrodynamic shaker (B&K 4809) is considered. The point mobility is measured with an impedance head (B&K 8001). In this study, only the radial vibration of the tyre

is measured. Using a Fast Fourier Transformation (FFT) based spectrum analyzer, one can obtain the mobility response of the system.

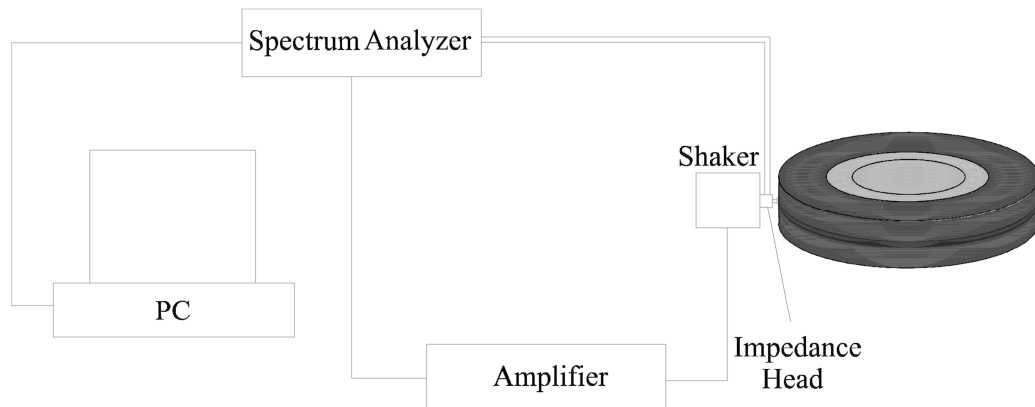


Figure 175 : Schematic of the experiment setup

4.3.2.3. Results and discussions

To compare the various models of tyre, several numerical studies will be addressed in this section. Furthermore, the effect of inflation pressure as well as the shape and property of the tyre are examined. In all the studies presented in this section, the models are subjected to a punctual excitation force as shown in Figure 176, also the reported results are corresponding to the excitation point.

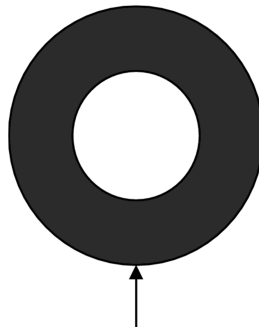


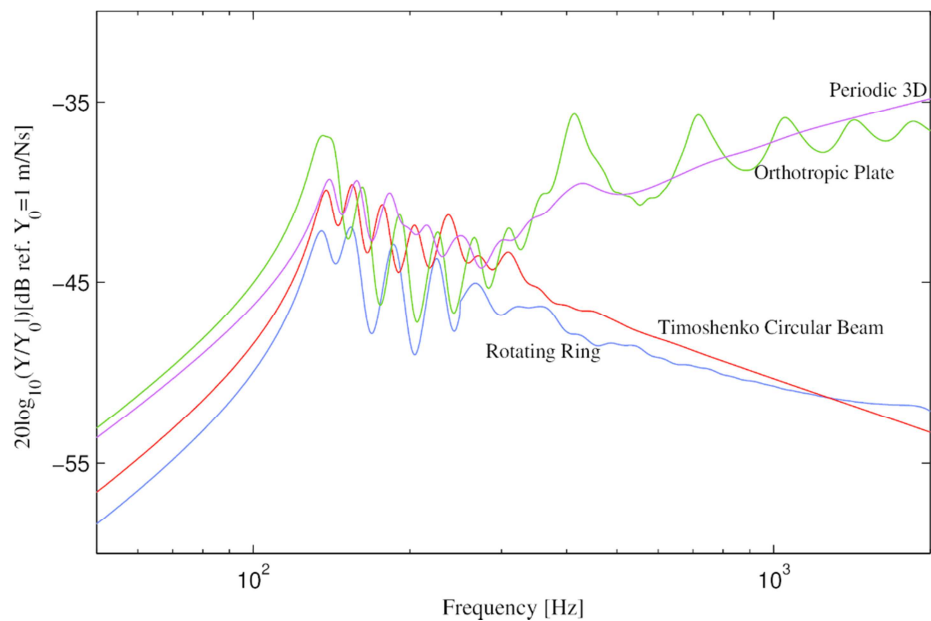
Figure 176 : A model of a tyre subjected to a punctual excitation force

4.3.2.3.1. Homogeneous smooth tyre

In the first study, a homogeneous smooth tyre inflated at 2 bars is considered. The material properties of the tyre are referred in Table 32. The radial point mobility calculated by the models of circular ring, orthotropic plate and periodic 3D are shown in Figure 177. As it is expected, the models of rotating ring and Timoshenko circular beam are in a good correspondence with the periodic 3D model at low frequencies whereas, at high frequencies, the point mobility given by the orthotropic plate model is very similar to the corresponding results of the periodic 3D model.

Table 32 : The mechanical and structural properties of the homogeneous tyre

Internal radius	165.1 mm
Width of tread	165 mm
Height of sidewall	115.5 mm
Young modulus	80 MPa
Poisson coefficient	0.49

**Figure 177** : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the rotating ring, circular beam of Timoshenko, orthotropic plate, and periodic 3D models of a tyre inflated at 2 bars

The results of a full 3D and a periodic 3D model are compared. It is assumed that the inflation pressure is zero, $p=0$. Figure 178 demonstrates the point mobilities pertinent to each model for a point force at position 1 and a receiver at position 2 in Figures 173. As it is seen, the results of the two models have a good agreement with each other, whereas, the computation time for the periodic 3D model is significantly less than for the full 3D model.

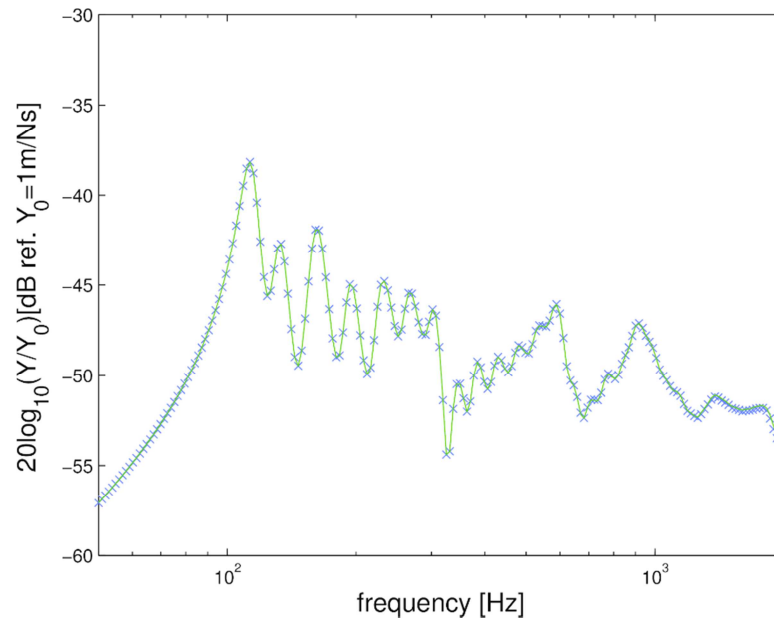


Figure 178 : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the full (x) and periodic 3D (–) models of tyre, the inflation pressure is ignored

The effect of inflation pressure is examined in this part. The point mobilities given by the periodic 3D model at pressures 0, 1, and 2 bars are plotted at Figure 179. It is observed that, at low frequencies an enhancement of the pressure causes the mobilities to decline while the resonance frequencies increase. But, at high frequencies the variation of the inflation pressure has no essential influence on the mobility.

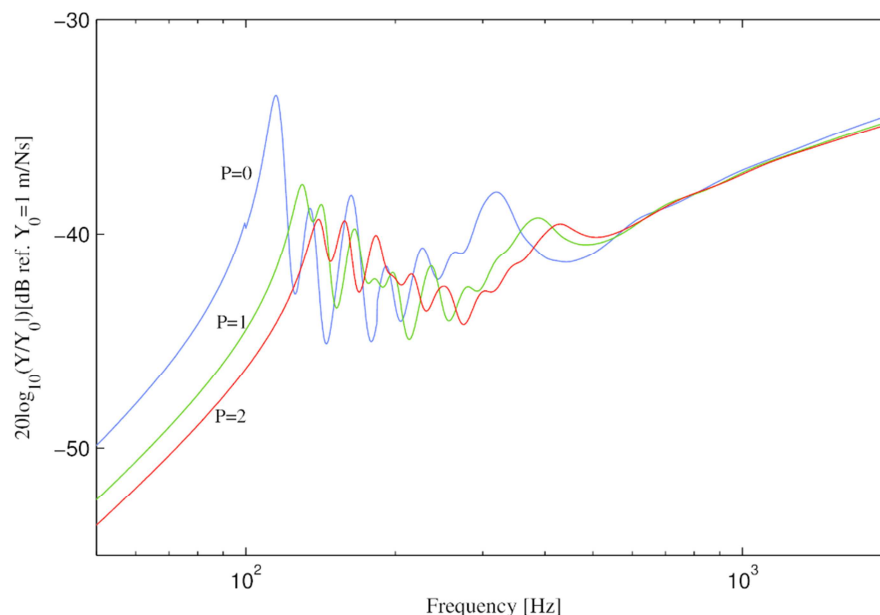


Figure 179: Effect of the inflation pressure on the radial driving point mobility obtained by a periodic 3D model of tyre

4.3.2.3.2. Homogeneous grooved tyre

When the frequency increases a notable difference between the point mobilities of the smooth tyre and the grooved one is observed. To this end, in this part the point mobilities of the homogeneous grooved tyre obtained by the different models of tyre are studied. We assume that the inflation pressure of the tyre is 2 bars. Figure 180 illustrates the results of the different models. Comparison of Figures 177 and 180 shows that, when the tread patterns are considered, the difference of point mobilities between the periodic 3D and

the other models increases. Interestingly, this discrepancy is noticeable especially at low frequencies for circular ring models and at high frequencies for orthotropic models. It can be due to the fact that intrinsically, the circular ring and orthotropic plate models are very simple models of a tyre in which the details pertinent to the physical characteristics of a real tyre are ignored.

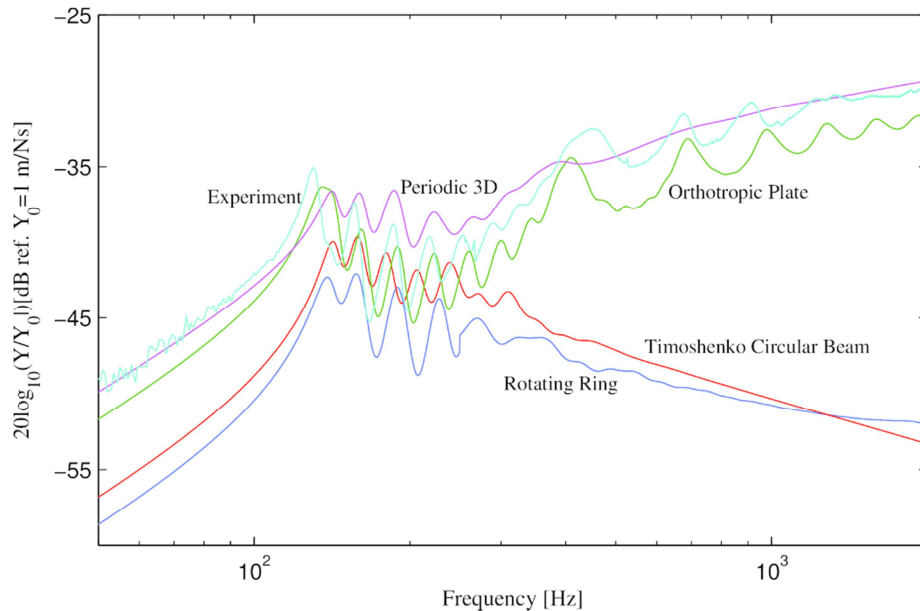


Figure 180 : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the rotating ring, Timoshenko circular beam, orthotropic plate, periodic 3D, and experimental results of tyre inflated at 2 bars

4.3.2.3.3. Non-homogeneous grooved tyre

Finally, a non-homogeneous grooved tyre, modeled by a periodic 3D method is studied (Figure 181). The inflation pressure of the tyre is 2 bars. The structural and material properties of the tyre are presented at Table 33. Figure 182 illustrates the results corresponding to the radial point mobility of the model.

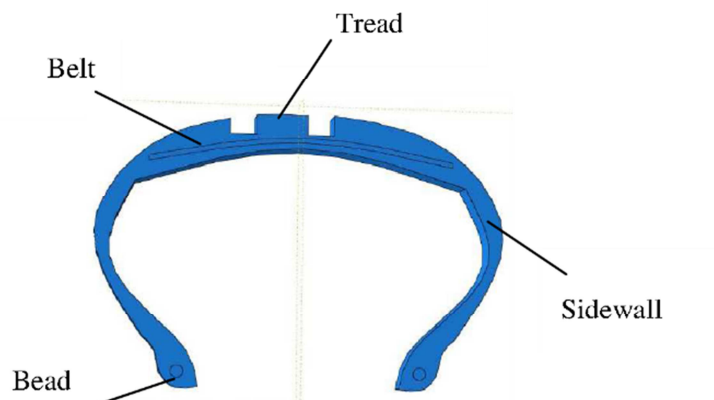
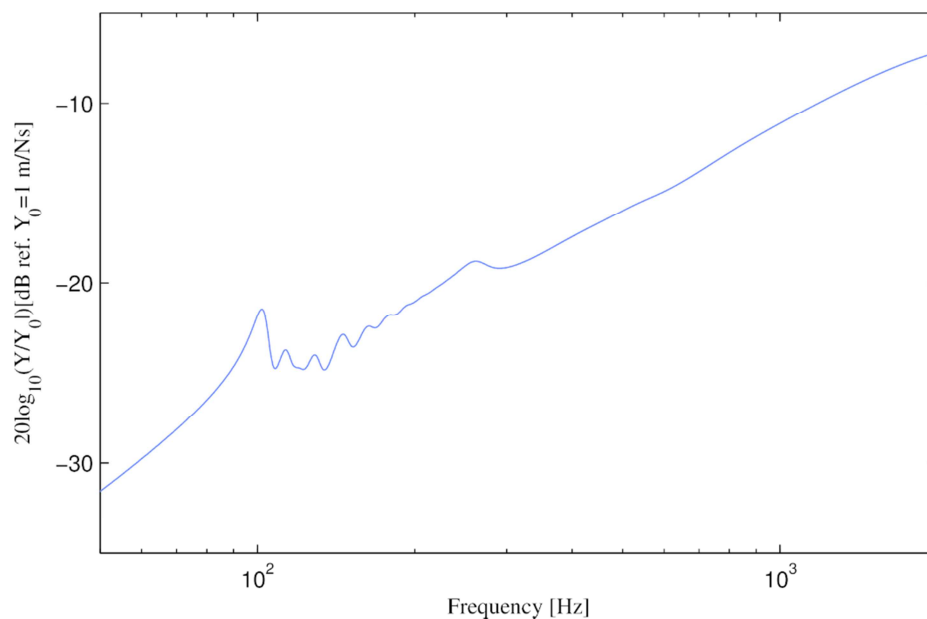


Figure 181: Cross section of a non-homogeneous grooved tyre

Table 33: The mechanical and structural properties of the non-homogeneous tyre [62]

Part	Parameter	Value
Tread	ρ	1000 kg/m^3
	E	7 Mpa
	ν	0.49
Belt	ρ	2014 kg/m^3
	E_x	660 Mpa
	E_y	9 Mpa
	ν_{xy}	0.4
	G_{xy}	183 Mpa
Sidewall	ρ	1000 kg/m^3
	E	109 Mpa
	ν	0.48
Bead core	ρ	7850 kg/m^3
	E	162.6 Gpa
	ν	0.33

**Figure 182:** The radial point mobility of a non-homogeneous grooved tyre modeled by a periodic 3D approach

4.3.2.4. Conclusion

In summary, we outlined the characteristics of various models of tyre as SDOF system, circular ring, orthotropic plate, 3D, and experimental results. When the tyre is subjected to an excitation, we compared the vibrational responses of the models. Generally, the results demonstrated that the circular ring models are valid for low frequencies while the orthotropic plate model provides reasonable result in high frequencies. Also, the point mobility of the tyre obtained from 3D and experimental results well agreed with each other. In addition, the effect of the inflation pressure as well as tread patterns were studied. It is observed that there is a significant discrepancy between the calculated point mobility and also resonance frequency for different pressures at low frequency but by increasing the frequency the discrepancy fades away. Moreover, considering of tread patterns plays an essential role in the results given by 3D models whereas it has no considerable effect on the results of other numerical models. It can be due to the simple nature of these models. Finally, the point mobility of the tyre with non-homogeneous material was reported in the current work. The presented study may find potential applications in study of rolling noise and rolling resistance.

4.3.3. Modélisation des mécanismes de pompage d'air

4.3.3.1. Introduction

Le phénomène de pompage d'air est une source importante du bruit de contact pneumatique/chaussée.

Ce mécanisme est lié aux compressions, dépressions et écoulements d'air se produisant dans la zone de contact. Il est difficile de mesurer son effet indépendamment des autres sources de bruit, et la physique du phénomène est de ce fait, mal connue. La réduction du bruit de roulement et l'optimisation des chaussées denses passent pourtant par la diminution du phénomène de pompage d'air. Cette source de bruit est d'autant plus importante pour les chaussées denses qui, par définition, ne présentent pas de porosité, principal facteur de réduction de ce phénomène. Il est par conséquent important de mieux comprendre et modéliser le pompage d'air. Deux principaux mécanismes de génération de bruit dus au pompage d'air sont aujourd'hui identifiés sans en connaître l'importance relative sur un revêtement routier dense réel : la variation de volume des cavités de la zone de contact (variation de volumes des rainures du pneumatique, indentation de la gomme du pneumatique par la rugosité du revêtement) d'une part, la compression de l'air par effet de couche limite d'autre part.

Deux approches sont proposées dans ce projet. Une modélisation analytique est tout d'abord mise en place dans le but de fournir un outil rapide d'évaluation du bruit de pompage d'air. L'étude se focalise ici sur le mécanisme générateur de bruit par variation de volume. Cette approche fait l'objet du paragraphe 4.3.3.2.

Une seconde approche, numérique, basée sur l'utilisation de la CFD (Computational Fluid Dynamics) est présentée. L'objectif est d'étudier la physique du phénomène, en particulier les mécanismes aérodynamiques tel que la compression de l'air par effet de couche limite, la ventilation de la zone de contact ou la porosité (qualifiée de « latérale ») produite par le réseau de cavités créées dans la zone de contact entre les deux surfaces en présence. Plusieurs configurations de cas académiques ont été considérées pour étudier le phénomène. L'approche CFD adoptée est présentée d'une façon générale dans le paragraphe 4.3.3.4. Quatre cas permettant de mettre en évidence les mécanismes à l'œuvre et l'influence de certains paramètres sont présentés dans les paragraphes 4.3.3.5 à 4.3.3.8.

4.3.3.2. Modélisation analytique

Une approche analytique a été menée pour modéliser le phénomène de pompage d'air. On s'intéresse ici plus particulièrement au mécanisme de génération de bruit par variation du volume des cavités de la zone de contact. Cette variation de volume est due à la déformation de la gomme dans les cavités formées dans le contact entre la couche de roulement du pneumatique et la texture de la chaussée.

Il est à noter que cette modélisation analytique a été mise en œuvre au début du projet sur des données de texture tridimensionnelle mesurée par la BAST dans le cadre du projet P2RN, afin d'en évaluer la qualité en termes de prévision des niveaux de bruit.

4.3.3.2.1. Analyse géométrique de la zone de contact

Dans un premier temps, une analyse géométrique de la zone de contact est réalisée afin de déterminer les paramètres géométriques pouvant caractériser la géométrie des cavités et donc influencer le phénomène de pompage d'air.

Le contact pneumatique/chaussée est examiné d'un point de vue statique et quasi-statique. La Figure 183 montre une représentation du volume d'air compris entre un pneumatique lisse et la chaussée dans la zone de contact. Ce volume d'air est calculé grâce à un modèle numérique de pénétration de la gomme pour un contact quasi-statique [63]. On constate que suivant la texture de la chaussée, les cavités de la zone de contact peuvent présenter des caractéristiques très différentes. La comparaison présentée dans la Figure 183 montre la présence de cavités fermées et de petits canaux peu profonds d'une part pour la chaussée C (Enduit Superficiel 0/8-1/5) et des cavités profondes connectées entre elles et vers l'extérieur d'autre part pour la chaussée F (Colgrip - haute adhérence).

De manière plus générale, le volume d'air peut se répartir entre des cavités, des poches (cavités fermées), des canaux ou un film d'air. Ces différentes géométries peuvent avoir des comportements différents du point de vue du pompage d'air. Une première estimation de la structure de la zone de contact peut être faite

à partir d'un calcul statique. La répartition du volume d'air en fonction de la profondeur relative permet de donner une information sur la tendance d'une chaussée à générer plutôt des cavités profondes, des cavités fermées ou un film d'air (cf. Figure 184).

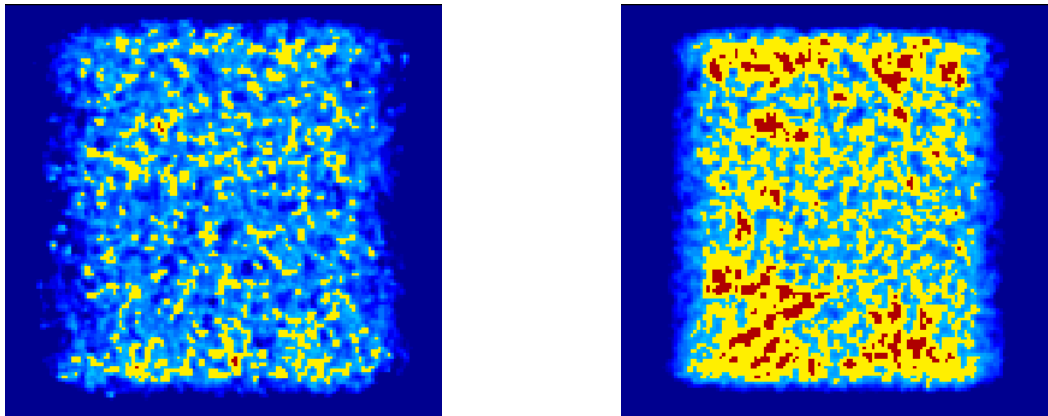


Figure 183 : Représentation graphique de la zone de contact à un instant donné pour les chaussées F (gauche) et C (droite) – zone en contact avec la gomme (jaune), cavités fermées (rouge), volume d'air ouvert (dégradé de bleu représentant la profondeur relative du volume)

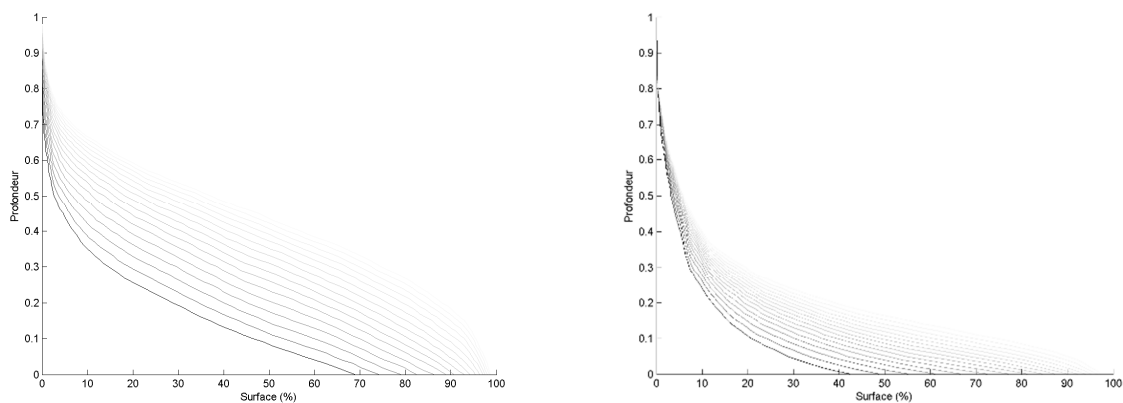


Figure 184 : Répartition du volume d'air dans la zone de contact en fonction de la profondeur pour plusieurs forces de contact (niveaux de gris) calculé pour un contact statique dans le cas des chaussées F (gauche) et C (droite)

4.3.3.2.2. Mise en place du modèle de source

Un modèle analytique de source de bruit dû au pompage d'air est mis en place. On considère ici le bruit généré par la déformation de la gomme de la bande de roulement d'un pneumatique lisse par la texture de la chaussée. La géométrie dynamique de la zone de contact est calculée à l'aide d'un modèle de contact quasi-statique [63] et d'une texture de chaussée 3D mesurée [1].

La source acoustique est due à la variation locale de débit. Le débit local Q dans la zone de contact est calculé dans le repère de la roue suivant l'expression suivante :

$$Q = \frac{d}{dt} (h_{pneu} - h_{pneu0}) \quad (17)$$

où h_{pneu} est la hauteur du volume, c'est-à-dire la hauteur entre les surfaces du pneumatique et de la chaussée, et h_{pneu0} la hauteur du volume de référence (ici, la hauteur moyenne). La dérivée seconde locale du volume, proportionnelle à la source de bruit est calculée sur toute la surface de la zone de contact. Le résultat de ce calcul est représenté dans la Figure 185 à un instant donné. On constate que les sources de bruit correspondant à l'accélération (points rouges) et la décélération (taches bleues) de la gomme se

concentrent principalement sur les bords avant et arrière de la zone de contact. Par une première approximation, on modélise les zones sources représentées dans la Figure 185 par deux sources linéiques.

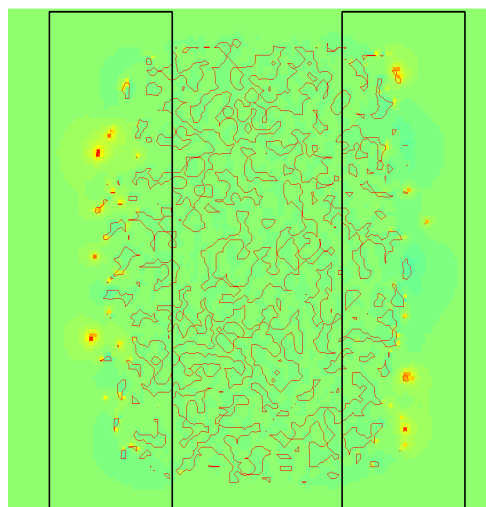


Figure 185 : Distribution des sources de bruit calculée à un instant donné – limites des zones en contact (-) – zones de source considérées (-)

4.3.3.3. Calcul du rayonnement acoustique

Le rayonnement du bruit généré par les deux sources linéiques est fortement influencé par l'effet dièdre dû à la géométrie cylindrique du pneumatique. Le calcul de la propagation acoustique est réalisé à l'aide de la méthode BEM (Eléments finis de frontière). Le résultat de calcul effectué pour le cas de la surface A' à 90 km/h est comparé au résultat de mesure CPX [1] et présenté dans la Figure 186.

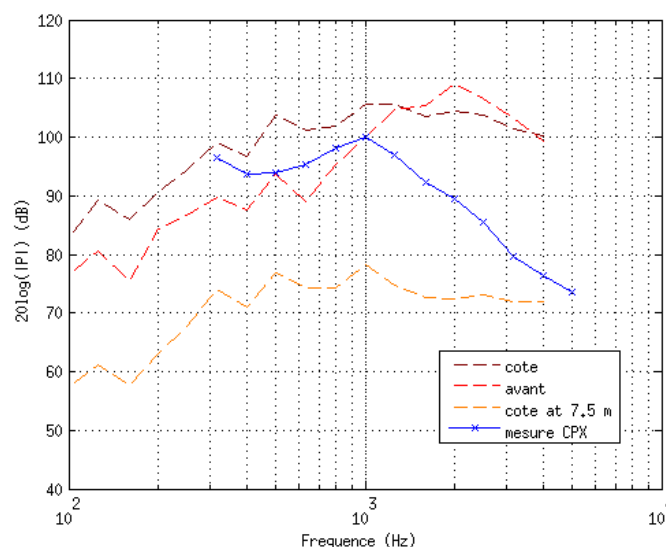


Figure 186 : Spectres de bruit par bande de tiers d'octave calculés et mesuré pour la chaussée A à 90 km/h

Le spectre de bruit calculé sur le côté est surestimé par rapport à la mesure CPX en montrant toutefois une bonne tendance en dessous de 1 kHz, mais dans la gamme de fréquence de prédominance du pompage d'air au-delà de 1 kHz, le niveau de bruit calculé est largement surévalué. Il est reporté dans la littérature

[64] que la vitesse finie des ondes dans la gomme introduit un temps de retard dans sa déformation non pris en compte dans le modèle. Ce phénomène a pour effet de filtrer les hautes fréquences et pourrait expliquer en partie la différence constatée entre les résultats du modèle actuel et les mesures.

4.3.3.4. Modélisation CFD

Une seconde approche, numérique, a été conduite dans le cadre du projet pour étudier de manière détaillée le phénomène de pompage d'air et plus particulièrement les mécanismes aérodynamiques en jeu. La méthode CFD (Computational Fluid Dynamics) permet de modéliser les écoulements d'air pour des configurations géométriques complexes et dynamiques. L'objectif de ces travaux est de modéliser le pompage d'air et le bruit généré pour des cas académiques permettant la compréhension physique du phénomène et la validation de l'approche.

La démarche générale utilisée consiste à se focaliser sur les phénomènes aérodynamiques se produisant dans les cavités de la zone de contact sans variation de volume. En effet, afin de pouvoir identifier la contribution des mécanismes de compression, la déformation dynamique de la gomme du pneumatique dans la zone de contact n'est pas prise en compte. Pour le premier des cas test présenté au paragraphe 4.3.3.5, une variation de volume a toutefois pu être prise en compte. La méthode CFD est utilisée pour simuler en particulier les processus aérodynamiques tels que la compression par effet de couche limite ou la ventilation de la zone de contact. Cette démarche reprend l'approche présentée dans [65] et se focalise sur la simulation de configurations 3D et sur une étude paramétrique réalisée en 2D pour laquelle les coûts en temps de calcul de simulations en 3D sont prohibitifs.

Pour la plupart des cas traités, un modèle numérique a été mis en place pour le cas d'un pneumatique lisse roulant à une vitesse donnée (80 km/h) sur une ou plusieurs cavités ou rainures placées sur une chaussée lisse. Le calcul numérique est basé d'une manière générale sur la résolution des équations de Navier-Stokes par la méthode des éléments volumiques finis. Dans la plupart des cas, l'écoulement dû à l'avancement de la roue peut être considéré comme négligeable et n'est pas pris en compte. Les seuls écoulements considérés sont dus aux déplacements des surfaces du pneumatique et de la chaussée. L'air est modélisé comme un gaz compressible et visqueux. L'écoulement est considéré comme turbulent. Cette turbulence est modélisée par une approche URANS (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes) par le modèle $k-\omega$, réputé pour sa robustesse pour la modélisation des écoulements proches des parois. Les calculs sont réalisés dans le domaine temporel. Une méthode de maillage glissant a été adoptée pour permettre de réaliser indépendamment les maillages du domaine fluide supérieur entourant le pneumatique d'une part, les cavités de la chaussée d'autre part. Tous les calculs sont réalisés avec le code de calcul ANSYS FLUENT.

Pour chaque cas traité, la démarche consiste à définir la géométrie et le modèle physique considéré. Le domaine fluide est ensuite maillé, étape qui peut être relativement fastidieuse pour l'ajustement du maillage afin d'assurer la convergence de la simulation en un temps de calcul admissible. Une fois le calcul terminé, les résultats font l'objet d'une analyse fine des signaux temporels obtenus et éventuellement d'une analyse spectrale sur la durée de la simulation afin d'en extraire des résultats dans le domaine fréquentiel.

4.3.3.5. Simulation CFD : Cavité cylindrique (3D)

4.3.3.5.1. Configurations

Un premier modèle numérique a été mis en place en 3D pour le cas d'un pneumatique lisse roulant sur une cavité cylindrique placée sur une chaussée lisse. Ce problème a été étudié expérimentalement par Hamet et al [66] et a permis de mettre en évidence le phénomène de pompage d'air pour une configuration où la pénétration de la gomme est relativement faible et où l'émission de bruit due à l'excitation vibratoire du pneumatique est très réduite. Le cas de référence choisi est celui d'un pneumatique lisse roulant à 80 km/h et d'une cavité de 15 mm de profondeur et 10 mm de diamètre (cf. Figure 187). La simulation est effectuée pour un domaine de calcul compris dans un quart de sphère de 1 m de rayon autour du pneumatique. Une condition de non réflexion des ondes de pression est appliquée au niveau de la frontière sphérique du domaine fluide. Le problème est considéré comme symétrique par rapport au plan passant par le milieu du pneumatique.

Une première simulation est effectuée sans variation de volume. Le modèle est ensuite raffiné pour permettre d'introduire une variation de volume de la cavité pour représenter la pénétration de la gomme du pneumatique dans la cavité.

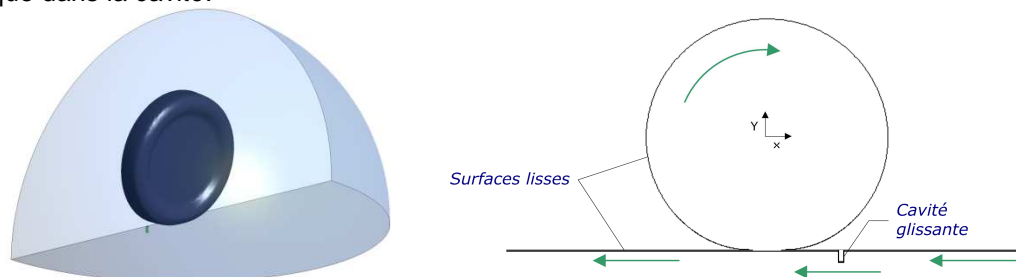


Figure 187 : Domaine fluide 3D (à gauche) et représentation 2D (à droite) de la configuration géométrique étudiée. Les flèches vertes représentent les déplacements des surfaces

La Figure 188 donne un aperçu du maillage de la cavité cylindrique et du dièdre entre les surfaces du pneumatique et de la chaussée utilisés pour le calcul.

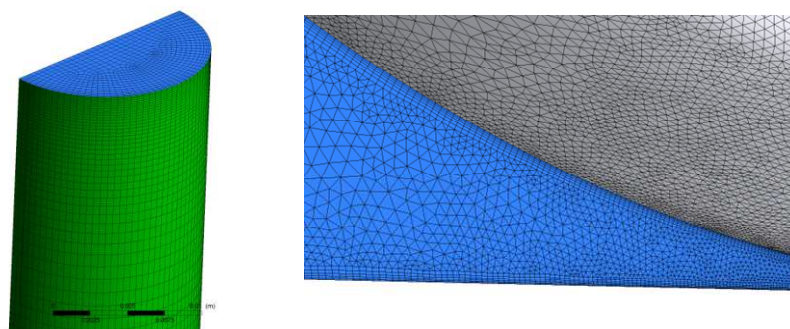


Figure 188 : Détails du maillage de la cavité cylindrique (à gauche) et du dièdre pneumatique/chaussée (à droite)

4.3.3.5.2. Résultats sans variation de volume

La simulation 3D de la compression et du relâchement de l'air est réalisée pour la cavité cylindrique. Le calcul permet de suivre l'évolution de la pression au fond de la cavité et de prédire qualitativement les différentes phases du phénomène, en particulier la compression de l'air à l'entrée de la zone de contact et la résonance de la cavité lors du relâchement de la surpression à la sortie de la phase de contact. La surpression calculée dans la cavité est environ deux fois inférieure à celle qui a été mesurée par Hamet [66] (voir Figure 189). Cette différence peut être expliquée en partie par la contribution de certains mécanismes non modélisés comme l'écoulement autour de la roue et la pénétration de la gomme dans la cavité. La comparaison entre calcul et mesure montre toutefois que le phénomène de compression par effet de couche limite responsable de la phase de compression rapide avant la fermeture de la cavité par le pneumatique est le principal mécanisme pour cette configuration.

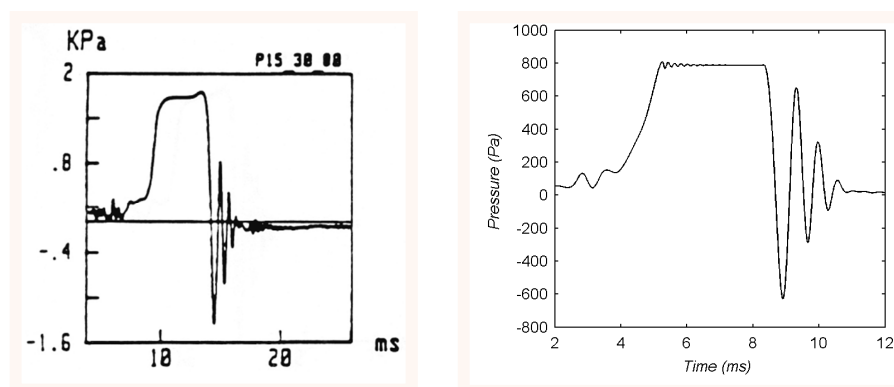


Figure 189 : Pression en fond de cavité en fonction du temps au cours du passage du pneumatique sur la cavité cylindrique – A gauche : mesure (Hamet et al., [66]) – A droite : Simulation CFD

Les résultats de la simulation montrent une onde due à la résonance de Helmholtz de la cavité se propageant à l'arrière du pneumatique (cf. Figure 190). Le signal de pression calculé à l'arrière est comparé au signal mesuré par Hamet (cf. Figure 191), et montre une bonne correspondance en terme de fréquence des oscillations et de forme. L'amplitude de l'onde reste toutefois inférieure à la mesure. Une onde de plus faible amplitude générée par la fermeture de la cavité est également calculée à l'avant. Cette onde a pu être observée au cours d'autres mesures [67]. L'approche suivie peut donc être validée qualitativement et permettre l'étude du pompage d'air pour d'autres configurations semblables. Les détails concernant ce cas sont donnés dans [68].

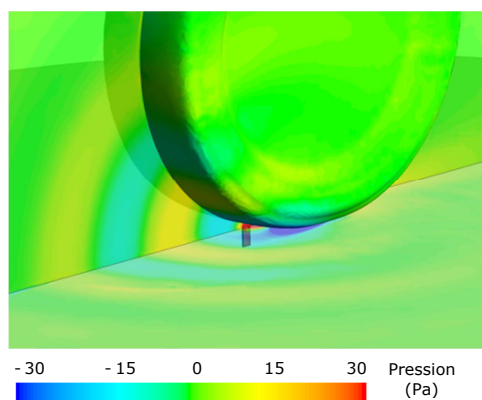


Figure 190 : Champ de pression à l'arrière du pneumatique à un instant donné

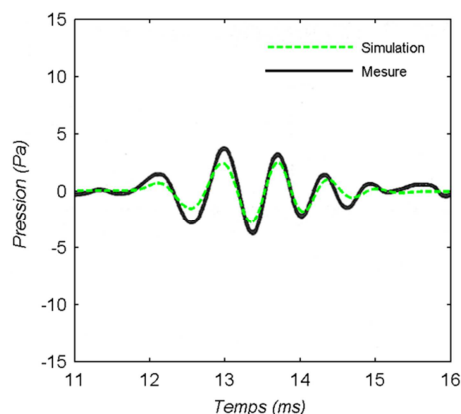


Figure 191 : Comparaison des signaux calculé et mesuré par Hamet et al. [66] à 32,5 cm à l'arrière du pneumatique pour une vitesse de 60 km/h

4.3.3.5.3. Résultats avec variation de volume

Le cas de la cavité cylindrique sans variation volumique a été complété par une simulation effectuée en 2D afin d'évaluer l'effet de la variation de volume de la cavité due à la déformation de la gomme lorsqu'elle obture la cavité. Cette variation de volume a été introduite en modifiant la géométrie de la cavité au cours du passage du pneumatique. Cette modification est réalisée en réduisant la hauteur de la cavité par l'intermédiaire d'un piston représenté sur la Figure 192. La variation de volume a été ajustée de manière à correspondre à la différence de pression mesurée et calculée dans la configuration sans variation de volume, en utilisant la loi de Laplace pour une transformation isentropique. La variation d'altitude du fond de la cavité obtenue, égale à 0,13 mm, correspond à une variation de volume de 0,43%.

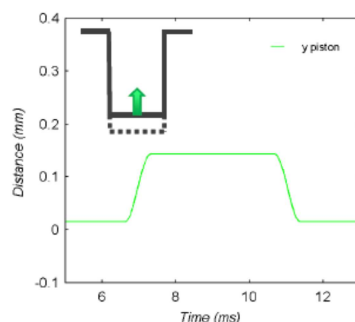


Figure 192 : Evolution au cours du temps de la hauteur du fond de la cavité contrôlant la variation de volume

Les résultats de la simulation avec variation de volume sont comparés à ceux obtenus en 2D sans variation de volume sur la Figure 193. On peut constater que la surpression obtenue dans la cavité à volume variable est plus proche des résultats expérimentaux que dans le cas de la cavité à volume fixe. La variation de volume a également une influence importante sur l'amplitude de l'onde générée à l'arrière du pneumatique à l'ouverture de la cavité. Elle n'a par contre que peu d'influence sur l'onde générée à l'avant du pneumatique.

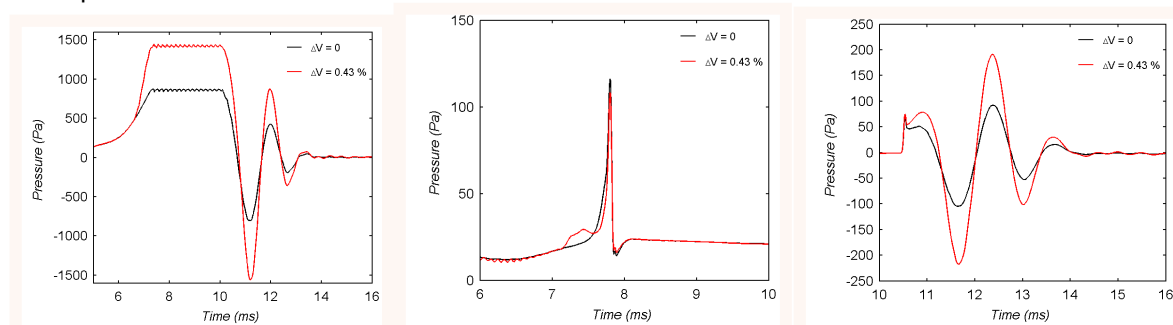


Figure 193 : Comparaison des pressions obtenues par un calcul 2D sans (courbes noires) et avec (courbes rouges) variation de volume- A gauche : pression en fond de cavité – Au centre : onde générée à l'avant – A droite : onde générée à l'arrière

4.3.3.6. Simulation CFD : Rainure transversale ouverte (3D)

Dans une zone de contact réelle, la plupart des cavités sont connectées entre elles et l'air peut circuler entre les cavités ou vers l'extérieur. L'approche suivie dans ce deuxième cas académique permet d'étudier l'effet de la ventilation de la zone de contact pour une configuration très simple d'une rainure transversale ouverte sur les côtés du pneumatique. Les résultats de simulation sont résumés ci-après. Ils sont détaillés dans [68].

4.3.3.6.1. Rainure transversale seule

Le modèle est appliqué tout d'abord au cas d'une rainure transversale de 10 mm de large et 2 mm de profondeur, ouverte sur les côtés et située sur une chaussée lisse (cf. Figure 194) pour un pneumatique roulant à la vitesse de 80 km/h. Les résultats de calculs montrent que comme pour le cas de la cavité cylindrique fermée, le mécanisme de compression aérodynamique génère une onde de pression à l'avant à la fermeture de la rainure et excite la résonance de la cavité pendant le contact rayonnant principalement à l'arrière du pneumatique (cf. Figure 195). La comparaison des résultats du calcul avec les mesures de pression dans la rainure de Ronneberger [69] permettent de valider le modèle qualitativement. Quantitativement, l'amplitude maximale du signal calculée est de l'ordre de 60% de l'amplitude mesurée.

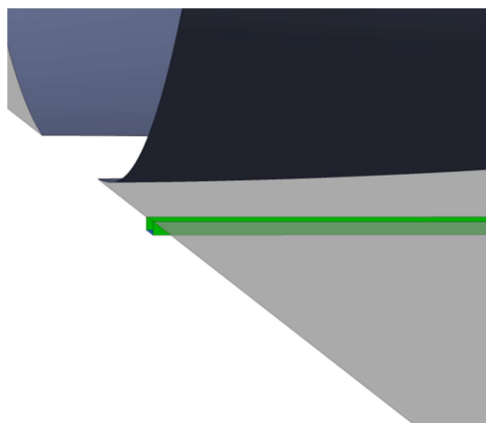


Figure 194 : Configuration géométrique du cas de la rainure transversale ouverte

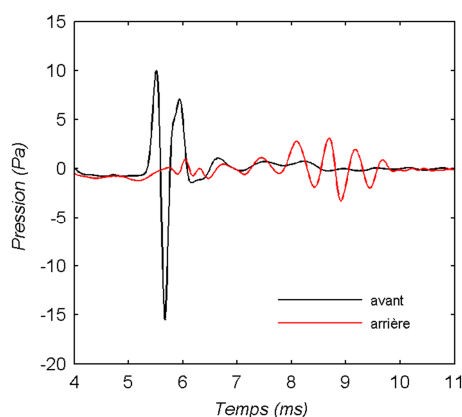


Figure 195 : Signaux de pression calculés à 20 cm à l'avant et à l'arrière de la zone de contact

4.3.3.6.2. Etude de la rainure transversale ventilée

Afin d'étudier l'effet de ventilation de la zone de contact pour le cas de la rainure transversale, une rainure longitudinale de même dimension placée au centre du contact est considérée (cf. Figure 196). La Figure 197 montre la comparaison de l'évolution de la pression dans la rainure proche du centre du contact pour les cas de la rainure ventilée ou non. La ventilation de la rainure réduit sensiblement l'amplitude de la résonance dans la rainure. La circulation de l'air dans la zone de contact a pour effet de modifier la distribution des sources de bruit et ainsi la directivité du rayonnement acoustique.

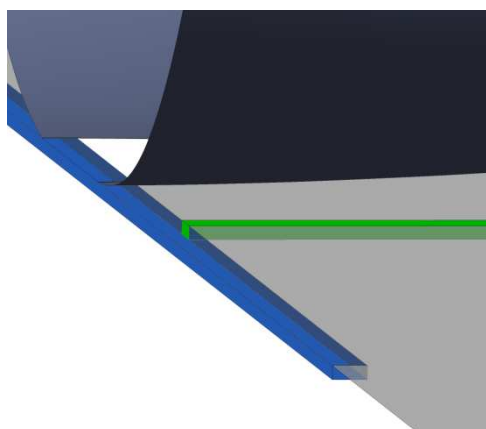


Figure 196 : Configuration géométrique du cas de la rainure transversale ouverte ventilée

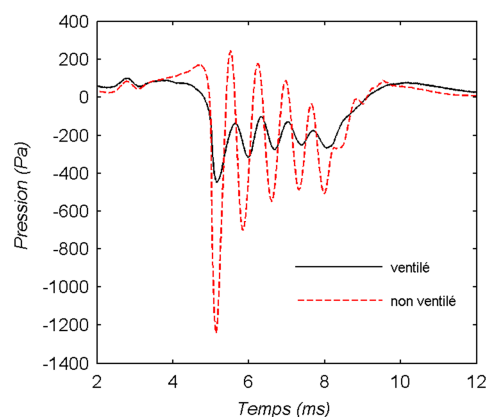


Figure 197 : Evolution de la pression calculée au fond de la rainure à 2,5 cm du centre du contact pour les cas de la rainure ventilée et non ventilée

4.3.3.7. Simulation CFD : Etude de la porosité latérale sur le bruit généré (2D)

Le cas de la rainure transversale ouverte, ventilée ou non, montre l'effet de la ventilation de la zone de contact sur le bruit émis par la rainure au passage du pneumatique. Sur des revêtements de chaussée denses, la présence de cavités fermées par l'enveloppe du pneumatique est susceptible de provoquer des niveaux de bruit dû au pompage d'air élevés. La présence d'une porosité « latérale » dans la zone de contact, c'est-à-dire la présence d'un réseau de canaux reliant les cavités entre elles, permettant de limiter les surpressions, est déterminante pour la réduction du bruit. L'objet de ce troisième cas est d'étudier l'effet de ces canaux sur les pressions développées dans la zone de contact et sur les niveaux de bruit émis sous la forme d'une étude paramétrique. Ce cas est résumé ci-après. Les détails sont donnés dans [70].

4.3.3.7.1. Configurations étudiées

La configuration choisie pour cette étude paramétrique est une configuration bidimensionnelle. On considère une série de cavités triangulaires de largeurs et profondeurs identiques (2mm) incluses dans une

chaussée lisse et réparties aléatoirement. Ces cavités sont connectées par des canaux horizontaux d'épaisseur h sous la surface du revêtement telles que représentées sur la Figure 198. Des simulations sont effectuées pour plusieurs valeurs d'épaisseur de canaux, allant de 20 microns à 0,5 mm, avec une configuration de référence sans connexion entre cavités ($h=0$).

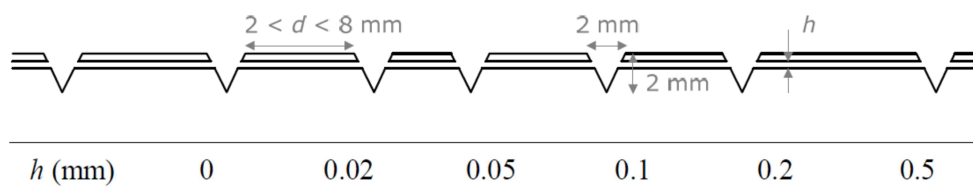


Figure 198 : Configuration 2D adoptée pour la caractérisation de l'effet de porosité latérale

4.3.3.7.2. Résultats de simulation

L'évolution de la pression au cours du passage du pneumatique dans une des cavités considérées est représentée sur la Figure 199(a). L'évolution de la pression pour la configuration de cavités fermées ($h=0$) est tout à fait similaire à celle observée pour la cavité cylindrique (paragraphe 4.3.3.5), avec une phase de compression, une phase durant laquelle la surpression est maintenue dans la cavité fermée par le pneumatique, et une phase de relâchement avec résonance de Helmholtz. Pour les canaux les plus fins, ($h=20$ microns et $h=50$ microns), la surpression est plus faible mais est tout de même maintenue pendant toute la phase de fermeture de la cavité. Dans ces deux cas, on peut également observer une résonance à l'ouverture de la cavité. Pour les canaux plus épais, l'air peut circuler suffisamment facilement dans la zone de contact pour dissiper la surpression et la résonance à l'ouverture disparaît.

Les tendances en termes de niveaux de pression acoustique calculés à 20 cm à l'avant et à l'arrière de la zone de contact (rapportée à une pression de référence de 1 Pa) sont données sur les Figures 199(b) et (c). Les maxima des spectres sont obtenus entre 2 kHz et 5 kHz. Concernant la pression générée à l'avant, la différence de niveaux maxima entre la configuration de cavités fermées et celles des canaux les plus épais est de l'ordre de 10 dB. Elle est beaucoup plus importante à l'arrière (de l'ordre de 25dB) à cause de la présence de la résonance de Helmholtz à l'ouverture des cavités pour les canaux les plus fins.

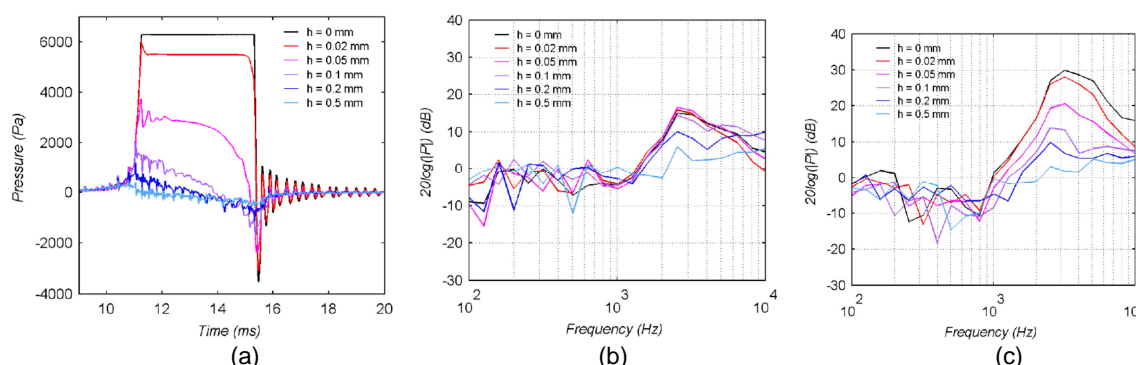


Figure 199 : Pressions calculées en fonction de l'épaisseur h des canaux – A gauche(a) : pression calculée dans une cavité au cours du passage du pneumatique – Au centre(b) : spectre de pression calculé devant le pneumatique – A droite (c) : spectre de pression calculé à l'arrière du pneumatique

L'observation des vitesses moyennes du fluide dans la zone de contact permet d'appréhender le flux d'air présent au passage du pneumatique. Si pour les canaux les plus fins, les vitesses moyennes sont relativement faibles (inférieures à 0,1 m/s pour les valeurs de h inférieures ou égales à 0,1 mm), elles deviennent importantes au-delà : environ 0,3 m/s pour $h = 0,2$ mm et 1,2 m/s pour $h = 0,5$ mm, donc très inférieures aux vitesses acoustiques.

4.3.3.7.3. Evaluation de la résistivité à l'écoulement de l'air et effet sur le bruit émis

La facilité (ou la difficulté) avec laquelle l'air peut circuler dans la zone de contact peut être caractérisée, comme pour les milieux poreux, par un paramètre physique, la résistance à l'écoulement de l'air. La

résistance à l'écoulement de l'air à travers la porosité latérale dans la zone de contact, peut être définie dans les configurations considérées plus haut comme le rapport entre la variation de pression ΔP et le débit volumique Q , $R = \Delta P / Q$. La résistance spécifique R_s et la résistivité r à l'écoulement de l'air sont alors définies par $R_s = R.A$ et $r = R_s / L$, où A représente la section du volume dans lequel se produit l'écoulement et L la distance dans la direction de l'écoulement sur laquelle la variation de pression ΔP se produit.

La résistivité à l'écoulement de l'air a été évaluée numériquement pour les configurations définies au paragraphe 4.3.3.7.1 ($h > 0$) pour différentes vitesses d'écoulement U comprises entre 0,01 m/s et plus de 1 m/s. La Figure 200(a) représente l'évolution de la résistivité à l'écoulement de l'air r en fonction de l'épaisseur des canaux pour la vitesse la plus faible $U = 0,01$ m/s en considérant l'écoulement incompressible. L'évaluation numérique est comparée à deux modèles analytiques basés sur le principe des écoulements de Poiseuille (fluide visqueux incompressible et écoulement laminaire) qui se révèlent tout à fait valide pour la faible vitesse considérée. On peut constater la diminution importante de r avec l'augmentation de l'épaisseur h .

La Figure 200(b) donne l'évolution de la résistivité (rapportée aux valeurs obtenues à faible vitesse dans le cas incompressible) en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement considérée pour les différentes épaisseurs de canaux. Les évaluations numériques sont effectuées soit en négligeant la compressibilité de l'air (courbes en trait continu), soit en la prenant en compte (courbes en trait tireté). Les marqueurs 'o' et 'x' représentent les valeurs maximales et moyennes observées dans les calculs de pompage d'air décrits dans le paragraphe précédent. Ces résultats permettent de montrer que dans les conditions de roulement l'effet de compressibilité peut être négligé, l'effet de vitesse doit par contre être pris en compte pour les canaux les plus larges.

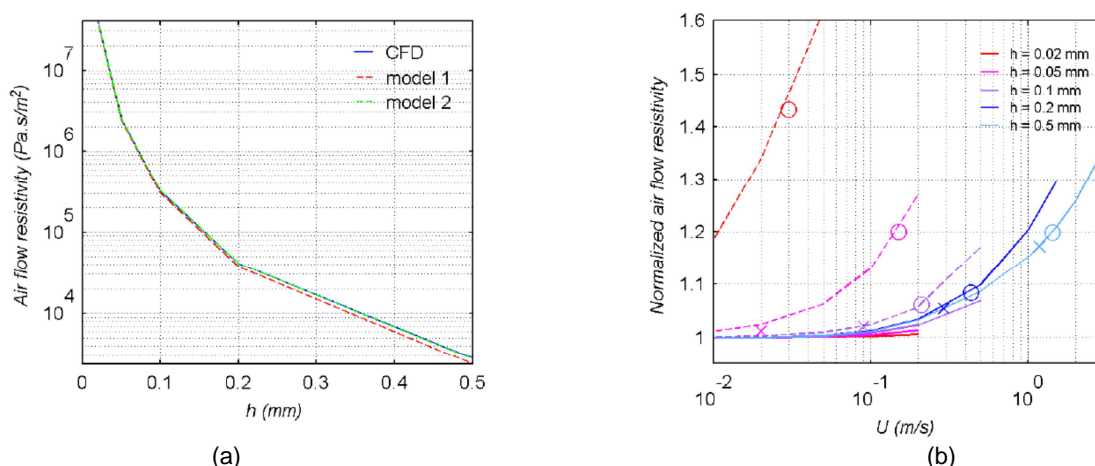


Figure 200 : Gauche (a): résistivité à l'écoulement de l'air pour $U=0,01$ m/s en fonction de l'épaisseur h des canaux – Droite (b): résistivité à l'écoulement en fonction de la vitesse U rapportée à la valeur pour $U=0,01$ m/s, pour les différentes épaisseurs de canaux

La Figure 201 représente l'évolution des niveaux de bruit (rapportés à une pression de référence de 1Pa) calculés dans le paragraphe précédent à l'avant et à l'arrière du pneumatique en fonction de la résistivité à l'écoulement de l'air obtenue pour les différentes épaisseurs de canaux. Pour de faibles valeurs de r , le bruit généré à l'avant se propage à travers les canaux et est resitué à l'arrière, les niveaux calculés à l'avant restant environ 2 dB plus élevés que ceux calculés à l'arrière. Une loi affine en $\log(r)$ peut être mise en évidence dans ce domaine pour le bruit émis à l'avant. Pour les valeurs de r plus élevées, le bruit émis à l'avant se stabilise et le bruit émis à l'arrière augmente considérablement à cause de la résonance des cavités. Une loi affine en $\log(r)$ peut également être mise en évidence dans ce cas pour le bruit émis à l'arrière.

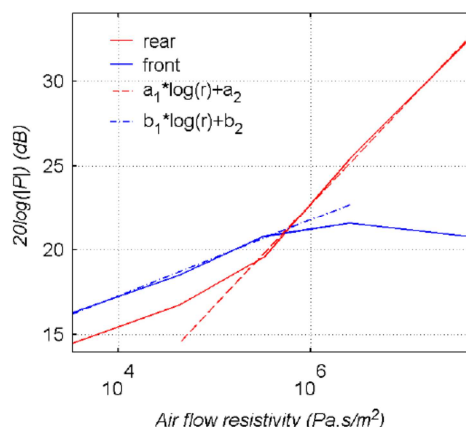


Figure 201 : Evolution des niveaux de bruit calculés à l'avant et à l'arrière du pneumatique en fonction de la résistivité à l'écoulement de l'air

4.3.3.8. Simulation CFD : Cas d'une surface rainurée dense (3D)

La dernière configuration traitée concerne le cas d'une surface rainurée similaire à la planche UHPC ayant fait l'objet d'une évaluation dans le cadre de la tâche 2. Cette simulation permet de montrer la possibilité d'envisager des simulations CFD sur des surfaces planes texturées même si le cas traité ici est encore assez éloigné d'une simulation sur une surface mesurée (déterministe ou aléatoire). Ce cas est résumé ci-après. Les détails sont donnés dans [70].

4.3.3.8.1. Configuration étudiée

Le cas traité concerne le roulement d'un pneumatique lisse en 3D sur une surface qui présente des rainures obliques de 1 mm² de section espacées de 7 mm constituant un quadrillage régulier tel que représenté sur la Figure 201. Le pneumatique passe à une vitesse de 80 km/h sur le réseau de rainures. La simulation est effectuée sur une longueur de 30 cm (le temps de simulation pour cette faible distance de calcul, sur une station de travail bi-processeur à 12 cœurs, est d'une dizaine de jours). Le problème est symétrisé et le calcul est effectué sur un quart de sphère.

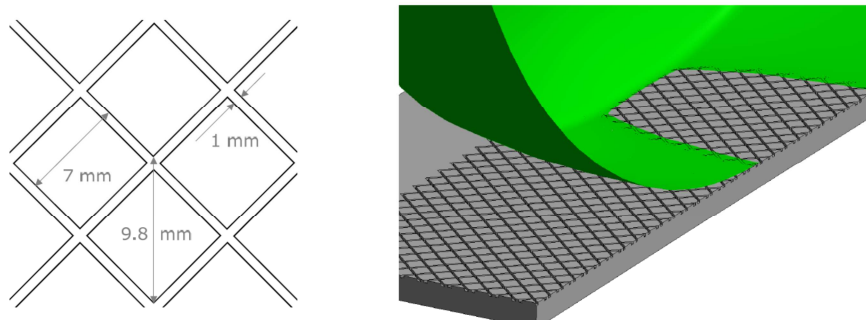


Figure 201 : Configuration de calcul adoptée – A gauche : réseau de rainures – A droite: géométrie du pneumatique et de la zone de contact

4.3.3.8.2. Résultats de simulation

L'allure globale de la variation de pression dans les rainures au passage du pneumatique est assez similaire à celle obtenue pour la rainure ouverte ventilée ou non (voir paragraphe 4.3.3.6). Les pressions calculées dans la zone de contact pour plusieurs positions latérales par rapport au centre de la zone de contact sont tracées sur la Figure 202(a). On peut noter une phase de compression progressive à l'approche du pneumatique puis une chute progressive de la pression au passage du pneumatique pendant laquelle les oscillations sont beaucoup moins marquées que pour la rainure seule ouverte, enfin une disparition soudaine de la dépression sans résonnance des rainures lorsque le pneumatique quitte la zone considérée. Une carte des pressions calculées dans les rainures à un instant donné, sur le quart avant droit

de l'empreinte du pneumatique, est donnée Figure 202(b). On voit clairement la surpression créée à l'avant et la dépression dans la zone de contact.

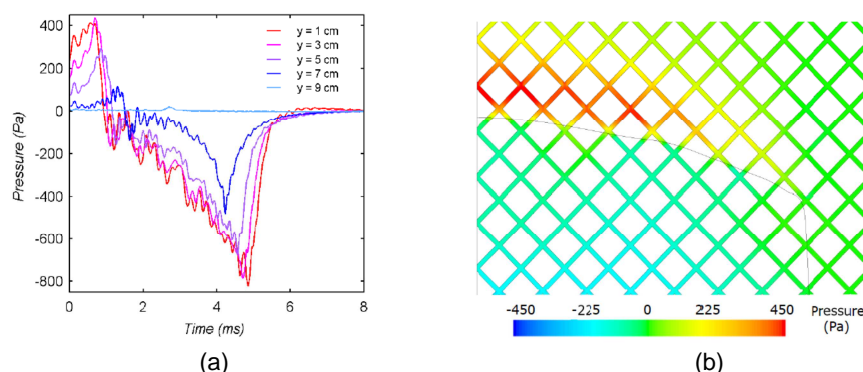


Figure 202 : A gauche(a) : pressions au passage du pneumatique pour différentes positions latérales par rapport au centre de la zone de contact – A droite (b) : Carte de pression vue de dessus

La pression acoustique a été évaluée en plusieurs points situés à 20 cm du centre de la zone de contact pour 4 positions angulaires θ par rapport à la direction de roulement ($\theta=0$ (front), $\theta=\pi/3$ (side-front), $\theta=2\pi/3$ (side-rear), $\theta=\pi$ (rear)). Les spectres correspondants ont été calculés pour une pression de référence de 20 μPa . Ils sont représentés sur la Figure 203. Les niveaux les plus élevés sont observés à l'avant, les plus faibles sur les côtés. On peut observer plusieurs pics liés au défilement des rainures, le plus élevé à 4490 Hz correspondant au défilement des croisements de celles-ci. On peut également noter un pic plus étalé en basses fréquences. Les niveaux calculés à 20 cm pour cette configuration restent toutefois assez faibles.

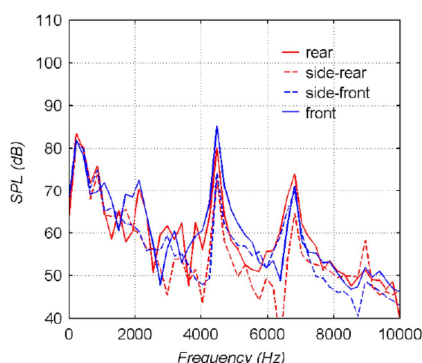


Figure 203: Spectres des pressions acoustiques évalués en plusieurs points situés à 20 cm du centre de la zone de contact

4.3.3.8.3. Evaluation de la résistivité au passage de l'air

Comme pour le cas des cavités triangulaires connectées (paragraphe 4.3.3.7), la résistivité à l'écoulement de l'air a été évaluée sur le réseau de rainures considéré. Les évaluations sont effectuées analytiquement ou numériquement sur un échantillon de 10 cm x 10 cm en considérant le fluide incompressible (cette simplification est justifiée par la résistivité relativement faible pour cette configuration). Un exemple de simulation réalisée sur un échantillon de 10 cm x 10 cm pour une vitesse donnée est représenté Figure 204. L'évolution de la résistivité en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement est représentée Figure 204 graphe de droite (courbe bleue). Elle peut être modélisée par une loi affine fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement (courbe verte). Les marqueurs 'o' et 'x' représentent les valeurs maximale et moyenne observées dans les calculs de pompage d'air décrits précédemment. Ici encore, les effets de vitesses par rapport à un écoulement de Poiseuille à faible vitesse (0,01 m/s) ne sont pas négligeables : la résistivité évaluée aux vitesses moyenne et maximale est respectivement 1,6 et 2,3 fois plus élevée que la valeur obtenue à faible vitesse (0,01 m/s).

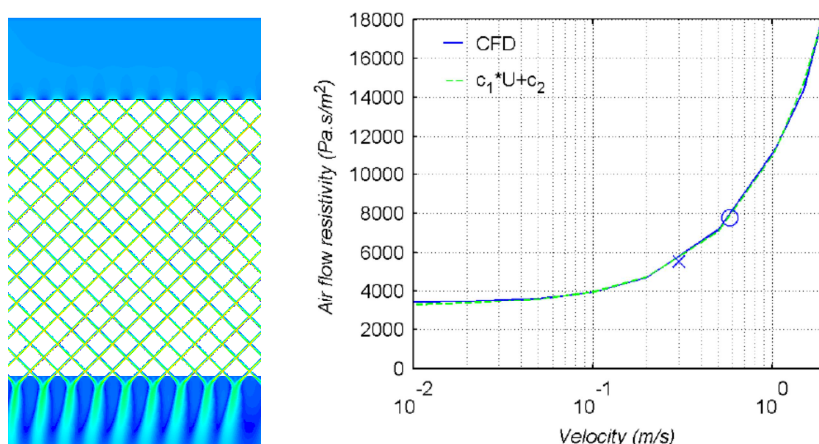


Figure 204: Evaluations de la résistivité à l'écoulement de l'air pour les réseaux de rainures – A gauche : visualisation d'un écoulement au travers d'un échantillon de 10 cm x 10 cm – A droite : évolution de la résistivité à l'écoulement en fonction de la vitesse moyenne

4.3.3.9. Conclusion

Deux approches de modélisation du phénomène de pompage d'air sont proposées. Une modélisation analytique a été mise en place pour le mécanisme générateur de bruit par variation de volume. Le modèle est appliqué à un pneumatique lisse et une texture de chaussée mesurée. Le calcul de la source de bruit est basé sur le calcul de la déformée de la gomme du pneumatique. Le calcul du rayonnement est réalisé avec la méthode BEM. La comparaison des résultats de calcul aux mesures de bruit montre que le modèle actuel n'est pas valide dans la gamme de fréquence correspondant au pompage d'air. Toutefois l'hypothèse de déformation instantanée faite par le calcul de la déformée quasi-statique de la gomme laisse penser qu'une modélisation plus réaliste de la dynamique de la déformation pourrait apporter de meilleurs résultats.

Une seconde approche, numérique, basée sur l'utilisation de la CFD est présentée. Un modèle a été mis en place pour plusieurs configurations académiques. La première configuration d'un pneumatique roulant sur une cavité cylindrique sans variation de volume a permis de valider l'approche qualitativement par comparaison aux mesures de Hamet. L'introduction d'une variation de volume de la cavité a permis d'obtenir des résultats quantitativement plus proches des résultats expérimentaux. La simulation permet de mettre en évidence les mécanismes de compression et de relâchement observés lors des mesures. L'approche a été appliquée ensuite au deuxième cas d'une rainure transversale ouverte. La comparaison aux mesures de Ronneberger a permis de valider également le modèle de manière qualitative pour cette configuration. L'introduction d'une rainure longitudinale a permis de mettre en évidence l'effet de la ventilation de la zone de contact en termes de réduction et de directivité du bruit généré. Cet effet de ventilation de la zone de contact a fait l'objet d'une étude paramétrique pour une troisième configuration (bidimensionnelle) d'une série de cavités triangulaires réparties aléatoirement connectées par des canaux d'épaisseur variable. Cette étude a permis d'étudier de manière fine le processus de génération du bruit en fonction de l'épaisseur des canaux et d'établir une loi d'évolution des niveaux de bruit en fonction de la résistivité à l'écoulement de l'air évaluée parallèlement. Enfin, une quatrième configuration d'une surface de chaussée rainurée a été étudiée et permet d'envisager des simulations de pompage d'air, sans variation de volume pour l'instant, sur des surfaces mesurées.

Globalement, ces simulations ont permis de mieux comprendre certains mécanismes à l'œuvre dans la génération du bruit de pompage d'air et de mettre en évidence certains paramètres clés de la génération du bruit comme la porosité latérale de la zone de contact. Toutefois, l'introduction d'une variation de volume n'a pu être prise en compte que dans le cas de la cavité cylindrique. La question de l'influence relative des deux mécanismes générateurs, effet de couche limite et variation de volume, dans le cas de revêtements denses à texture aléatoire demeure. Cette question est déterminante pour la prévision des niveaux du bruit de pompage d'air dans les modèles hybrides.

4.3.4. Modélisation de l'effet dièdre considérant les textures du pneumatique et de la chaussée (*en anglais*)

4.3.4.1. Introduction

Horn effect is an essential noise enhancement mechanism. The tyre/road system can be considered as a horn-like structure. The surfaces of the tyre and the road constitute horns in front of and behind the contact zone. The noise generated in the contact zone is amplified by the multiple reflections between the tyre surface and the road surface which are acoustically reflecting surfaces. The amplification of the horn effect reaches up to 10 to 20dB in the results of previous studies, where the road and the tyre are modeled with smooth surfaces. The amplification can be calculated by Eq.(18), where P is obtained in Figure 205(a) and P_{ref} is calculated in Figure (b). In the calculations of P and P_{ref} , a source is located in the horn between the tyre and the road.

$$A = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (18)$$

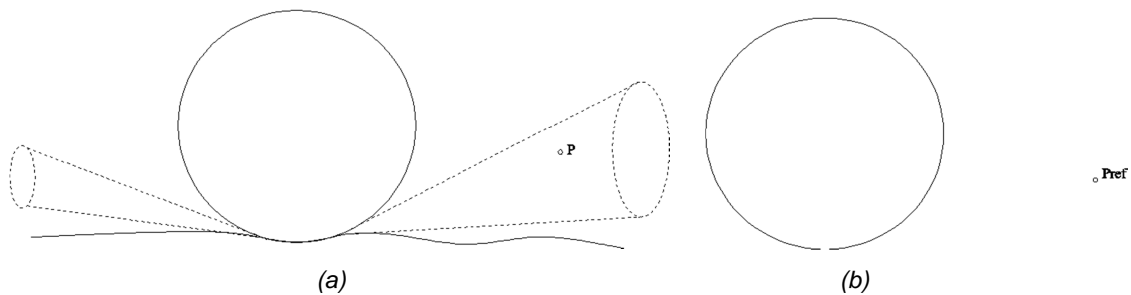


Figure 205 : (a) Tyre on the road; (b) Tyre without the road

Tyre treads and road textures in the contact zone between the tyre and the road can be considered as acoustic network resonators. The acoustic fields around the tyre/road system are influenced by the network resonances. The resonances of the pipes in the contact zone between the tyre and the road in Figure 206 are seen as one of the noise enhancement mechanisms in the previous studies. However, this conclusion may be incorrect if the pipe resonances are investigated together with horn effects, because the horns between the tyre/road system and the pipes in the contact zone constitute the boundary of the acoustic fields together. In fact, the sound fields can be reduced around the resonant frequencies. Since the network resonators in the contact zone have large influences on the acoustic field around their resonant frequencies, the acoustic behaviors inside the networks and the resonant frequencies should be investigated in detail.

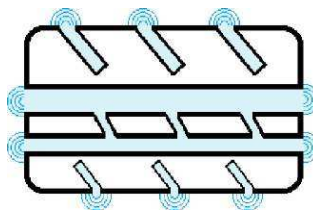


Figure 206 : Pipe resonators in the contact zone between a tyre and a road

Besides, we also try to optimize the tyre treads and road textures in order to reduce the amplification of horn effect. P is still calculated in the case where a tyre is on the road, and P_{ref} is still obtained in the case where no road is under the tyre. In the latter case, whether the tyre is smooth or has tread patterns P_{ref} is

almost the same. Therefore, we only investigate the influences of the networks between the tyre and the road on the acoustic pressure P .

4.3.4.2. Model

In this work, the horn effect and the pipe resonances will be investigated in the same model. In this model, the surfaces of the tyre and the road can be seen as flanges, and air at the ends of the pipes between the tyre and the road can be considered as pistons on these flanges. If there are incident waves on the pistons, the acoustic fields inside the pipes will be excited and there will be waves radiating from the pistons to the exterior domain. So, computational methods of the acoustic radiation of the baffled pistons should be developed. For the acoustic radiation of a piston with an infinite flange, we have analytical solutions. But the surfaces of the tyre and the road are very complex, so numerical methods should be used. Since boundary element methods are suitable for complex surfaces, we will propose a multi-domain coupling method based on BEM to solve the problem.

Tyre/road systems with networks can be considered as arbitrary flanges with networks (see Figure 207). In Figure 207, a point source S is put near the flange. The acoustic wave at point R includes three parts: a wave directly from the source, a wave reflected from the flange without network and a wave radiating from the network with flange. The wave from the source arrives at pipes ends and then propagates in the network. The straight parts of the network are very thin compared with the wavelengths to be analyzed. The working frequencies of the source are below the cut off frequencies of straight parts. So there is only a plane wave motion in the straight parts that consists of a forward travelling wave and a backward reflected wave. The waves in the junctions of the network have higher order modes, but they don't propagate in the straight parts.

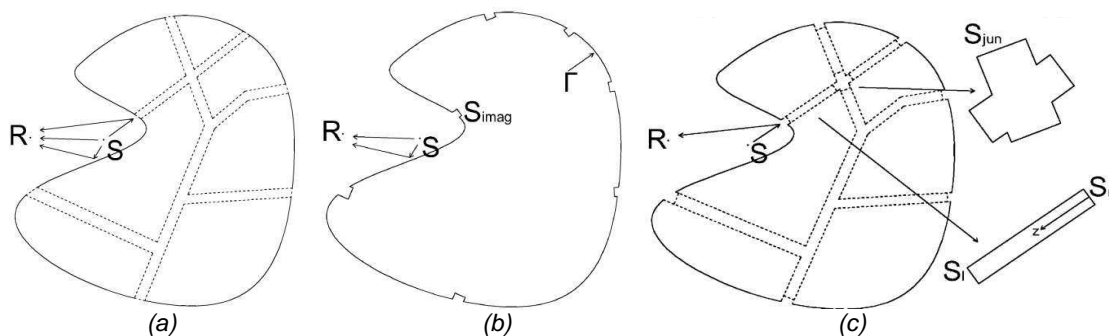


Figure 207 : An arbitrary flange with a network inside: (a) Total pressure; (b) Pressure directly from the source and reflected by the flange; (c) Pressure radiating from the network

In Figure 207(b), imaginary pipe ends are used instead of the real ends. The imaginary ends are inside the network but close to the real ones. The imaginary surfaces S_{imag} are perpendicular to pipes walls. Thus, at S_{imag} the wave is uniform and the velocity is perpendicular to the imaginary end, which is useful in the method proposed in this work. However, it is not uniform at the real ends, even if the real ends are perpendicular to the network walls, because the cross sections change suddenly.

4.3.4.2.1. Multi-domain coupling methods

For the calculation of acoustic fields of the flanged network, BEM of one computational domain is available, but only for very simple case, as BEM needs fine mesh around the resonant frequency of the air in the network to get converged solutions. Substructuring techniques can reduce the matrix size and the total computational time for complex structures. Dividing the whole acoustic domain into several subdomains is the main idea of the multi-domain coupling method. Each subdomain, which could be an exterior or an interior one, has a well-defined boundary and the same material property.

In boundary element methods, for a problem with a bounded domain, the integral equation to be solved is given by

$$c_e(\mathbf{x})p(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma} p(\mathbf{y}) \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}_y}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} - \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}_y}(\mathbf{y}) G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} + p_{inc}(\mathbf{x}) \quad (19)$$

The surface Γ includes the flange and the imaginary network ends. The incident pressure $p_{inc}(\mathbf{x})$ is from the source without the structure. G is the Green function. \mathbf{n} is the unit normal vector pointing into the domain. To get the total pressure p_{tot} in the exterior domain, let $c_e(\mathbf{x}) = 1$, and the pressure $p(\mathbf{y})$ and its derivative $\partial p / \partial \mathbf{n}_y$ on the surface Γ should be calculated first.

To get the pressure $p(\mathbf{y})$ and its derivative $\partial p / \partial \mathbf{n}_y$ on the surface Γ of a complex network with flange, the computational domain should be divided into an exterior subdomain and an interior subdomain by creating imaginary ends for the network. The exterior subdomain is solved by BEM to get BEM system matrices and an excitation vector. The interior subdomain can be solved by analytical methods (transfer matrix) or numerical methods (FEM or BEM) to get the relation between p and $q = \partial p / \partial \mathbf{n}$ at these ends. Then the exterior and interior subdomains are coupled at the interfaces. Finally, by solving the overall equation system, one has $p(\mathbf{y})$ and $\partial p / \partial \mathbf{n}_y$ on the surface Γ .

4.3.4.2.2. Exterior subdomain

In Eq. (19), for a point \mathbf{x} on Γ , $c_e(\mathbf{x})$ equals 1/2 if the surface Γ is regular at this point. The discretization of Eq. (19) is obtained from a mesh of the surface of the domain. Then a linear system (20) can be obtained whose solution gives an approximation of the solution on the surface Γ .

$$\mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{B}\mathbf{Q} = \mathbf{P}_{inc} \quad (20)$$

\mathbf{P} , \mathbf{Q} and \mathbf{P}_{inc} are vectors of pressure, derivative of pressure and incident pressure, respectively. \mathbf{A} and \mathbf{B} are BEM system matrices.

For the exterior subdomain, dividing the vectors into vectors of imaginary ends and vectors of flange, one has

$$\mathbf{A}_E \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{ep}^E \\ \mathbf{P}_f^E \end{bmatrix} + \mathbf{B}_E \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{ep}^E \\ \mathbf{Q}_f^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{inc}^{ep} \\ \mathbf{P}_{inc}^f \end{bmatrix} \quad (21)$$

The subscripts and superscripts ep and f mean the imaginary ends of the pipes and flange, respectively, and E means exterior. Matrices \mathbf{A}_E and \mathbf{B}_E can be obtained by solving the problem in Figure 207(b) with BEM software. In the BEM software, using the rigid boundary condition on the surface Γ , one can get \mathbf{A}_E . Using the soft boundary condition, one can get \mathbf{B}_E . The incident pressure p_{inc} can be obtained in either of the two computations above.

4.3.4.2.3. Straight parts of the network

Pipes in the contact zone of a tyre/road system are in the same plane, so they can be considered as two dimensional networks. In this work, we use two assumptions when modelling the network: there are only right-angled junctions in the networks and the networks have the same cross-section. For a straight part of the network, the transfer matrix can give the relation between pressures and velocities.

In a network a straight part between a flange and a junction or two junctions, whose central axis is labelled as z , is thin compared to the wavelength to be analyzed. There is only plane wave consisting of a forward travelling wave and a backward reflected wave. Pressure p and its derivated q are constant on a plane perpendicular to z . One has the equation of motion considering viscous losses at rigid wall of the thin pipes

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + R \bar{v} \quad (22)$$

with the average velocity \bar{v} at the pipe cross-section, and the damping coefficient of the thin pipe

$$R = \frac{1}{r} \sqrt{2\eta\rho\omega} \quad (23)$$

where r is the radius of the circular pipe, and η is the coefficient of shear viscosity.

The equation of continuity and equation of state do not change, then the wave equation can be obtained

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{R}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (24)$$

Its solution can be given as

$$p(z) = a \cos k'z + b \sin k'z \quad (25)$$

With $k' = k + i\alpha$, where C is the absorption coefficient for the viscous losses

$$\alpha = \frac{1}{rc} \sqrt{\frac{\eta\omega}{2\rho}} \quad (26)$$

The average velocity can be obtained

$$\bar{v} = \frac{1}{i\rho\omega - R} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (27)$$

Surfaces S_r and S_l in Figure 207(c) have different normal directions. For one node on $S_r (z = z_r)$, p and q can be written as

$$\begin{aligned} p_r &= a \cos k'z_r + b \sin k'z_r \\ q_r &= k'a \sin k'z_r - k'b \cos k'z_r \end{aligned} \quad (28)$$

On $S_l (z = z_l)$

$$\begin{aligned} p_l &= a \cos k'z_l + b \sin k'z_l \\ q_l &= -k'a \sin k'z_l + k'b \cos k'z_l \end{aligned} \quad (29)$$

Get a and b from Eq. (28), and then substitute them into (29). The relation of p and q between one node on S_r and another node on S_l can be obtained

$$\begin{bmatrix} q_r \\ q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_r \\ p_l \end{bmatrix} \quad (30)$$

In Eq.(30), p can be expressed as the mean value because the pressure is constant at each pipe end. So q of any node i on S_r and q of any node j on S_l becomes

$$\begin{bmatrix} q_{ri} \\ q_{lj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{i=n_r} p_{ri} \\ \frac{1}{n_l} \sum_{j=1}^{j=n_l} p_{lj} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Here n_r and n_l are node numbers at each end.

Thus, the relation between p vector \mathbf{P}_e and q vector \mathbf{Q}_e at the two ends can be written as

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{S}' \mathbf{P}_e \quad (32)$$

where the transfer matrix

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} \frac{t_{11}}{n_r} \mathbf{J}_{nr,nr} & \frac{t_{12}}{n_l} \mathbf{J}_{nr,nl} \\ \frac{t_{21}}{n_r} \mathbf{J}_{nl,nr} & \frac{t_{22}}{n_l} \mathbf{J}_{nl,nl} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$\mathbf{J}_{i,j}$ is a matrix with i lines and j columns, where each element is equal to one.

The impedance of a pipe with viscous losses can be given as

$$Z_v = \frac{l}{\pi r^3} \sqrt{2\eta\omega\rho} - \frac{\rho l}{\pi r^2} \omega i \quad (34)$$

where l is the pipe length.

Thermal conduction losses should also be taken into account in thin pipes besides viscous losses according to the measurements in the previous research. The coefficient of shear viscosity η used above should be replaced by an effective coefficient η_e . The latter is defined by

$$\eta_e = \eta \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{P_r}} \right]^2 \quad (35)$$

where γ is the ratio of specific heats of air, and P_r is the Prandtl number.

4.3.4.2.4. Junctions of the network

For the junctions of the 2D network, Mile's theory is suitable for obtaining the relation between pressures and velocities. Only rectangular pipes and three types of junctions will be considered, which are L shaped, T shaped and cross junctions. The higher order modes are required in order to satisfy the boundary conditions imposed by the junctions.

Miles introduced the transmission line and impedance analogies for plane discontinuities, and gave the relations between pressures and velocities of right-angled joint ends in rectangular pipes, which can be used to get the boundary conditions at the junction ends. In Miles theory the propagation of the principal wave is represented by the voltage and current on a transmission line. An impedance element of the equivalent circuit for the junctions is calculated to give the effect of the high order modes on the principal wave.

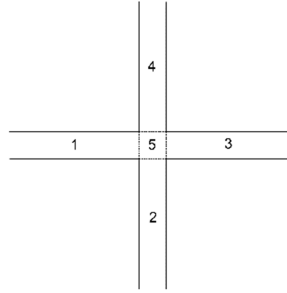


Figure 208 : Two dimensional junctions

The junction under consideration is shown in Figure 208. There are n straight pipes and one has $n = 2$ for L junction, $n = 3$ for T junction and $n = 4$ for cross junction. The problem is considered as 2D, for which the incident waves are assumed to be plane and the depth of the pipes is irrelevant. The voltages and currents are respectively denoted by U_0 and I_0 at the junction ends. They are assumed related through the admittance matrix (Y_{ij}) such that

$$I_0^i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_0^j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (n = 2, 3 \text{ or } 4) \quad (36)$$

The first approximations of Y_{ij} are given as

$$\begin{aligned} Y_{12} &= Y_{21} = Y_{23} = Y_{32} = Y_{34} = Y_{43} = Y_{14} = Y_{41} = iY_0 \theta^{-1} \\ Y_{13} &= Y_{31} = Y_{24} = Y_{42} = iY_0 \csc \theta \\ Y_{11} &= Y_{22} = Y_{33} = Y_{44} = iY_0 \cot \theta \end{aligned} \quad (37)$$

With $Y_0 = \rho c / S$ and $\theta = ka$. $S = a^2$ is the straight pipe cross section area.

At the junction ends, one has the relations

$$p = \sqrt{S} I_0 \quad (38)$$

$$v = \sqrt{S}^{-1} U_0 \quad (39)$$

Thus, one has the relations between pressures and velocities at the junction ends.

For a flanged 2D network, one has equations (36), (38) and (39) for each junction, the analytical relation (32) for the two ends of each straight pipe and the system equations (21) for the exterior subdomain. So one can get the overall equations system. After applying the boundary conditions to the flange and tube walls and solving the overall system, the values of p and q for each node on the whole surface Γ can be obtained.

4.3.4.3. Optimization methods

Around the resonant frequencies, the network has a large influence on the acoustic fields outside the flange. The values and number of resonant frequencies vary according to the network structures. Because of this dependence, it should be possible to find the wanted resonant frequencies or a maximum number of resonant frequencies by optimizing the network structure.

The parameters that describe a network are the number and positions of ends, junction types, junction positions and pipe cross-sections. In this work there are only longitudinal and transverse pipes in a network, so the junction positions depend on the end positions. If the end positions are known, the junction positions are known. The 2D network considered here consists of the three types of junctions shown in Figure 209.

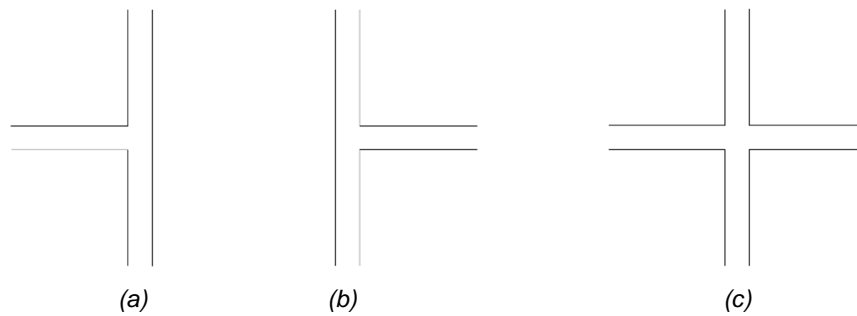


Figure 209 : (a) T junction with left branch; (b) T junction with right branch; (c) Cross junction

Different networks can be formed by using different parameters. Their resonant frequencies can be estimated by the finite element method. By changing the parameters, networks with the wanted resonant frequencies or a maximum number of resonant frequencies can be found. Optimization methods should be adopted to optimize the parameters. Genetic algorithm (GA) is used for this purpose.

4.3.4.3.1. Genetic algorithm

The chromosome representations should be decided first. GAs operate on a number of potential solutions, called a population of chromosomes, consisting of some encoding of the network parameter set. The binary and integer chromosome representations are used. For a network, each parameter of junction type is encoded as an integer in 0, 1 or 2 which represent the junction types in Figure 209, and the other parameters of network dimensions (such as end positions, cross-sections and so on) are encoded as binary strings.

Then the initial population can be generated by using a random number generator. There are two parts in a population, a binary part of network dimensions and an integer part of junction types. We can create a random binary matrix of size $Nind \times Lind$ for the parameters of network dimensions, where $Nind$ specifies the number of individuals and $Lind$ the length of the individuals. For the parameters of junction types, we can give an integer (0, 1 and 2) matrix of size $Nind \times Lind^{jun}$ where $Lind^{jun}$ is the number of junctions. By combining these two matrices, the initial population is obtained.

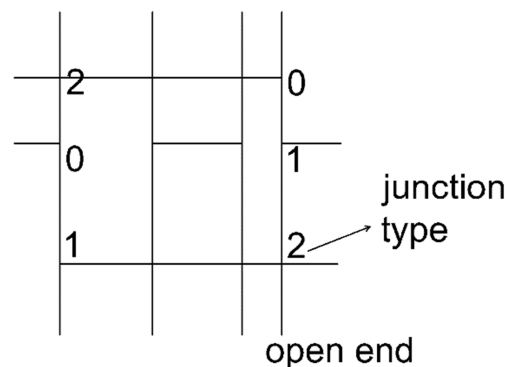


Figure 210 : An example of network for the chromosome representation

Here is an example of an individual in a population of networks

$$\left[\overbrace{0100\dots 1111}^m, \underbrace{0101\dots 0101}_l, \dots, 0101\dots 0111, \overbrace{2, 1, 0, \dots, 1, 0, 2}^n \right] \text{ network } i \quad (40)$$

This is the chromosome representation of the network in Figure 210. The network has 3 rows and 4 columns. In the first part of the chromosome, there are m dimension parameters and each one has l binary strings which can be converted to a real value. So there are m real values, and for this network m

is 8. We specify the boundary of the network, so the open ends move only on this boundary and along with the junctions. Therefore, we only need to generate the real values for the coordinates of the junctions and the cross sectional area of the network. Since we use the same cross section for the network, only one real value is needed for the area. The other seven real values represent the positions of the three rows and four columns which determine the coordinates of the junctions. In the second part of the individual there are $n = 12$ junctions and each integer represents the junction type. If this population consists of k networks, its chromosome representation is a $k \times (m + n)$ matrix.

The purpose of this work is to find the wanted resonant frequencies or as many resonant frequencies as possible by designing and optimizing the network. The 2D FEM has been used for estimating the values and the number of resonant frequencies f_r of a network.

If f_w is the wanted resonant frequency and there are several resonant frequencies for the network i , the objective function for the first purpose is given by

$$ObjV_1(x_i) = \min(|f_{r1} - f_w|, |f_{r2} - f_w|, \dots) \quad (41)$$

where x_i is the chromosome of network i .

If the purpose is to find as many resonant frequencies as possible, the objective function is the number of the resonant frequencies. A minus sign is added to get a minimization problem. One has

$$ObjV_2(x_i) = -count(f_{r1}, f_{r2}, \dots) \quad (42)$$

We can minimize the two objective functions, which only depends on the parameters of the network (dimensions and junction types).

For the minimization problem, the most fitted individuals have the lowest numerical values of the associated objective function. The raw objective values in equation (41) or (42) are usually only used as an intermediate stage in determining the relative performance of individuals. The fitness function is normally used to transform the objective function value into a measure of relative fitness. Here, individuals are assigned a fitness according to the rank of their raw objective values in the population rather than the raw performance.

A population is first initialized and then improved through repetitive application of the mutation, crossover and selection operators. This process is repeated until a fixed number of generations has been reached. If we are not satisfied with the results, we can adjust the specified parameters of GA or networks and then run the optimization program again until we get targeted resonant frequencies.

4.3.4.3.2. 2DNRF

In the optimization method, we calculate the resonant frequencies of a network by a numerical method '2DNRF' based on FEM. There are analytical solutions for simple pipes such as a straight pipe, a T-shaped pipe and so on. However, numerical methods should be adopted in order to get the resonant frequencies of complex networks. It is assumed that there is a plane wave in the straight parts of the network for the cross-sections which are quite small compared to the wavelengths.

In the network, there are columns of air. Waves traveling in air will reflect back when they reach the end. A standing wave is created at the network's resonant frequency. An open network will resonate if there is an anti-node at each open end. These anti-nodes are places where there are maximum velocities and minimum pressures ($p = 0$). However, these zero pressures are not at the physical ends of the network as they are altered by their contacts with air. In fact they are at the end correction positions of the network. The method for the calculation of the end corrections will be introduced in the following section.

The resonant frequencies can be obtained by solving an eigenvalue problem of an undamped finite element model.

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (43)$$

K is the stiffness matrix, M is the mass matrix, $\omega = 2\pi f$ and ϕ is the eigenvector.

Finite element software Abaqus is chosen to perform the resonant frequencies extraction procedure, which is a linear perturbation procedure. The networks have open ends. The impedance boundary conditions cannot be applied to these ends in Abaqus. So their end corrections should be taken into account in the models. The branches with open ends in finite element models are created a little longer than their physical lengths. Since at the resonant frequencies the pressures are zero at the end correction positions, zero pressure boundary conditions are applied. The other boundary conditions are rigid.

For a 2D network whose junctions and branches are in the same plane, an automatic calculation procedure can be implemented to get the resonant frequencies. Abaqus GUI will generate an input file '*.inp' which is sent to the processor while running a simulation. A simple case of a straight pipe is solved to get the '*.inp' file which can be modified for complex networks. In this file, the straight pipe mesh information is deleted, then mesh information of the network to be solved is added. New node and element sets are defined for the zero pressure boundary conditions. The other parts of this file keep the same data as before.

Since 2D meshes are quite easy to get, Matlab is used to create the mesh information for the network, and the node and element sets for the boundary conditions. The other information from the old file of straight pipe is written into the new '*.inp' file by Matlab as well.

Abaqus scripting is a powerful tool for combining the functionality of the GUI of Abaqus and the power of the programming language Python. After finishing the actions such as opening the Abaqus result file '*.odb' and outputting the results, a script file '*.rpy' will be created including these actions. Then the file '*.rpy' should be renamed as '*.py' which can be submitted directly to Abaqus by commands in order to output the results. The results will be saved in a text file.

The automatic procedure for calculating the resonant frequencies of 2D network is: create the '*.inp' by Matlab, submit it to Abaqus by commands in Matlab, and then call Abaqus output script '*.py' in Matlab. This Matlab programme is named as '2DNRF'.

4.3.4.3.3. End corrections

End corrections should be estimated first when we calculate the resonant frequencies. The length is an important parameter for calculating the resonant frequencies of a network with open ends. A short distance should be added to each end of the network to get precise results. This short distance is called the end correction, which makes each straight part of the network a little longer than its physical length.

From the perspective of waves, standing waves occur during the network resonances. The sound waves are reflecting at open ends, which are not perfectly at the end sections of the network, but at small distances (end corrections) outside the network.

The end corrections of the network open ends can be obtained from the radiation impedances which have small but finite values by

$$\tilde{\delta} = \text{Re} \left[k^{-1} \arctan \left(\frac{-Z_r}{i\rho c} \right) \right] \quad (44)$$

The upper script \sim means that it is a frequency-dependent quantity. Here only the real part of the end correction is considered, which is the most useful in the present study.

To estimate the end corrections of the network, the radiation impedances of the open ends should be calculated first by the impedance transfer equation (45) of acoustic transmission line, because Z_r cannot be calculated or measured directly at the pipe end.

$$Z_r = -i\rho c \tan \left[\arctan \left(\frac{-Z_l}{i\rho c} \right) - kl \right] \quad (45)$$

Z_l is the impedance at an abscissa $x = -l$, i.e., at a distance l from the open end. It can be calculated by Dalmont's numerical methods of BEM.

Equation (45) means that the radiation impedance can be obtained from the case where Z_l is an input impedance of a pipe of length l . Then the end corrections can be obtained by equation (44).

The values of end corrections depend on flange shapes. An open pipe end with different flange shapes has different end corrections. In this section, end corrections of a network with complex flanges are calculated by Dalmont's methods. The flanges are a round surface and a plane surface (see Figure 211).

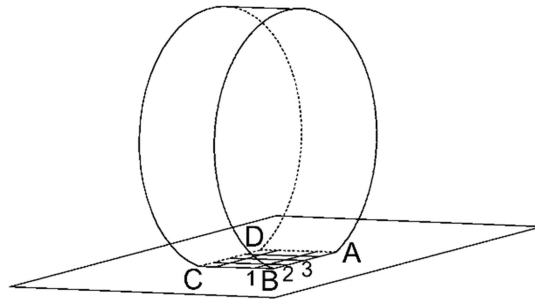


Figure 211 : Network between a round surface and a rigid plane surface

Only the end corrections of longitudinal pipes will be discussed. For transverse pipes they can be calculated approximately by Dalmont's fit formula (46) for rectangular flanges because the flange of transverse ends is flat.

$$\delta_{sq} = \delta_{sq\infty} + \frac{a_{sq}}{b_{sq}} (\delta_{sq0} - \delta_{sq\infty}) + 0.057 \frac{a_{sq}}{b_{sq}} \left[1 - \left(\frac{a_{sq}}{b_{sq}} \right)^5 \right] a_{eff} \quad (46)$$

with $\delta_{sq\infty} = 0.811a_{eff}$ and $\delta_{sq0} = 0.597a_{eff}$, in which $a_{eff} = 2a_{sq} / \sqrt{\pi}$. Here, $2a_{sq}$ and $2b_{sq}$ are pipe width and flange width, respectively. b_{sq} is the shorter one of the two distances between the transverse end and the sides AD or BC in Figure 211.

The longitudinal pipes at different positions have different shapes and dimensions of the flanges. Although their ends may not be in the middle of the flanges, in the interest of simplicity they are assumed in the middle of the flanges. The round surface in Figure is a cylinder. In the contact zone, the cylinder surface is flat.

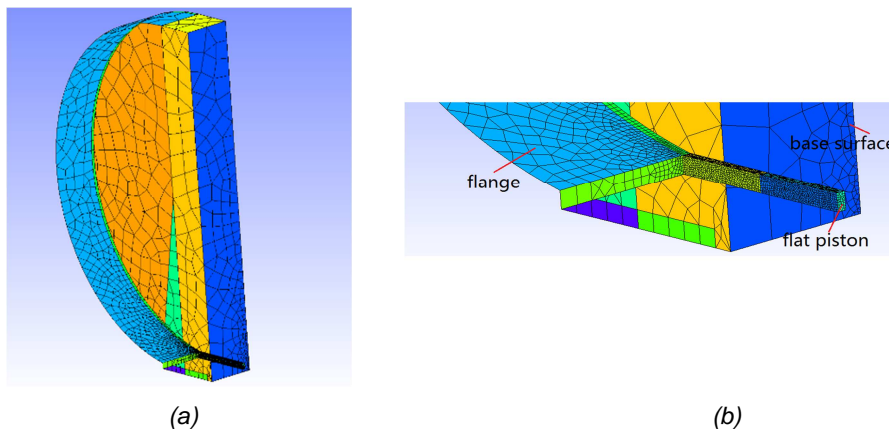


Figure 212 : (a) Half of meshes of the boundary element model of a rectangular tube with a cylindrical flange; (b) Details of the mesh of the tube

In order to calculate the end corrections of longitudinal pipes, half a cylinder is meshed for BEM, which is shown in Figure 212. Since the plane surface is rigid, it can be considered as a symmetric plane. A symmetric plane of the cylinder exists, so only half of the cylinder is meshed. The radius of the cylinder is

0,27m. The half pipe has a rectangular cross-section with an area of $0,0045\text{m} \times 0,009\text{m}$. The length is 0,1m. It has an open end and a closed end which has a unit velocity as boundary condition. The base surface behind the piston is modelled as flat to reduce the elements because the flange shape behind the piston has no influence on the end correction of the open end of this pipe. It has a very small impedance which is used to minimize the reflections. Other parts of the model are rigid.

The acoustic pressure at the central node of the closed end is calculated by a BEM software. The acoustic velocity is unity, so the impedance of the piston is obtained. Then the radiation impedance is calculated from this impedance by equation (45).

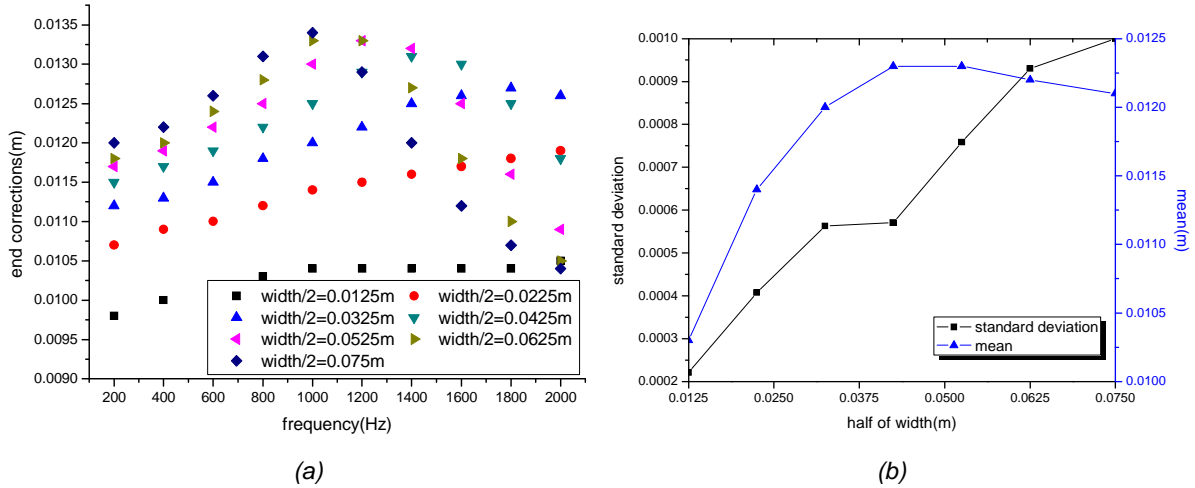


Figure 213 : (a) End corrections of longitudinal pipes with cylindrical flanges of different widths within 2000Hz ($ka < 0,23$); (b) Standard deviations and mean values of end corrections of longitudinal pipes with cylindrical flanges of different widths

The end corrections of the longitudinal pipe for cylinders of different widths are shown in Figure 213(a) ($ka < 0,23$), and the frequency interval is 200 Hz. The cylinder radius is 0.27m. For each width of the cylinder, the end corrections are frequency-dependent, but their standard deviations are very small (see Figure 213(b)), which indicates that they tend to be very close to the mean values. The standard deviation is calculated by equation (47). So the mean values of end corrections for each width in Figure 213 are used to get a fit formula (48) of end corrections, in which w is half of the width.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (47)$$

with $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, where x_i is the end correction at each frequency and N is the number of frequencies calculated.

$$\delta = 0.00808 + 0.22128w - 3.72112w^2 + 19.80897w^3 \quad (48)$$

The same procedure can be used to get the fit formula (49) for pipes with flanges of tyre surfaces. There are grooves on the tyre surface (see Figure 214).

$$\delta = 0.00936 + 0.26929w - 5.77679w^2 + 41.66667w^3 \quad (49)$$

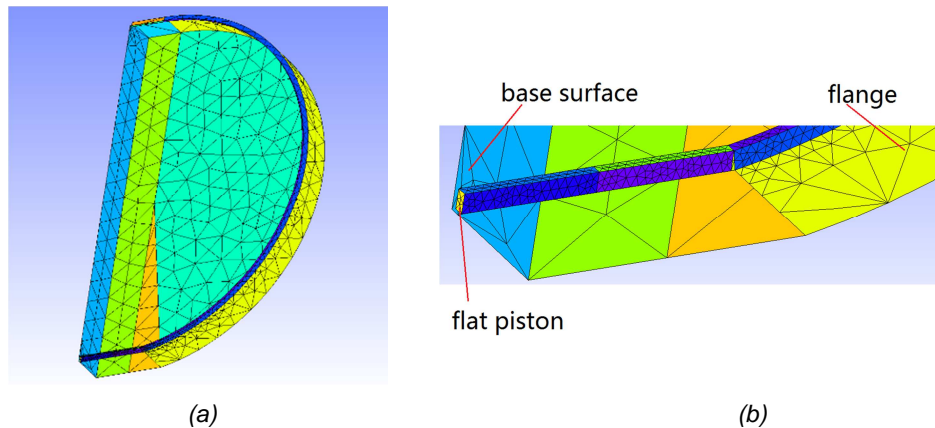


Figure 214: (a) Half of meshes of the boundary element model of a rectangular tube with a part of tyre flange; (b) Details of the mesh of the tube

4.3.4.4. Simulation and experimental validation

In this section, the multi-domain coupling methods, the matlab codes 2DNRF and optimization methods of resonant frequencies are validated with measurements. We use woods to build networks, flanges and plane surfaces, for woods are easy to cut, bend, shape and glue. Besides, woods can give the rigid boundary conditions used in our simulations. A real tyre on the road is also measured and calculated.

4.3.4.4.1. Wooden structures

In this section, experiments will be carried out to validate the model and methods proposed before. The flange could have an arbitrary shape. For the sake of convenience, a circular flange in Figure 216 is used in both numerical simulations and experiments. The radius and width of the cylinder are 0.27m and 0.15m. Its location can be seen in Figure 215. The sketch of the experimental setup is shown in Figure 215. The locations of the source and receiver are exchanged in Figure 216 thanks to the reciprocity principle. The experiments are performed in a large testing hall to avoid influences of the reflections from the wall. The plywood on the floor in Figure 216 is used to simulate the rigid plane surface. Sweep signals within 2000Hz are generated by a generator. The generator, amplifier and B&K pulse data acquisition system can be seen in Figure 216. The center of the speaker is at (1;0;0,06). The microphone is at (0;1;0,005).

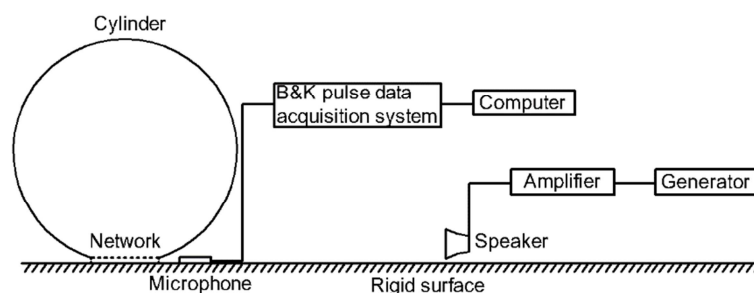


Figure 215 : Sketch of experimental setup



Figure 216 : (a) The experimental set-up; (b) flange used in calculations and experiments

In our simulations, a dimensionless point source is used, and it has been assumed omnidirectional. In our study the predicted results will not be compared directly with the measured results. Instead, the general tendencies and frequency-dependent variations of the sound pressure will be compared between the predicted and measured results. Such comparisons are very common and widely used in previous studies. So it is not necessary to use an omnidirectional source in our experiments. A real loudspeaker, whose signal is digitally generated, is used as source in the experiments. The dimensions are $0,12 \times 0,12 \times 0,12\text{m}$.

Network

The network in Figure 217 between a cylinder and a plane surface is calculated and measured to validate the multi-domain coupling methods proposed before. When we measure the case without network, we close the pipe ends with woods.



Figure 217 : (a) Network; (b) Wooden network between a cylinder and a plane surface

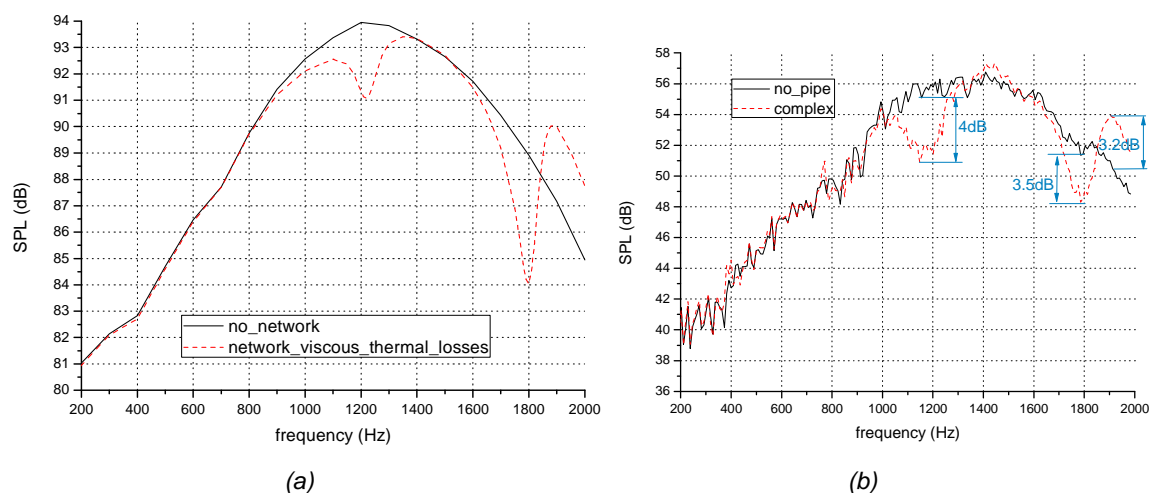


Figure 218 : SPL of the network between a cylinder and a plane surface: (a) Predicted results; (b) Measured results

Table 34 : Predicted and measured results

Predicted frequencies	Predicted differences	Measured frequencies	Measured differences
1220Hz	2,85dB	1200Hz	4,00dB
1800Hz	4,88dB	1800Hz	3,50dB
1880Hz	2,44dB	1900Hz	3,20dB

The predicted and measured results can be seen in Figure 218. There are three SPL extrema around the two resonant frequencies 1232 Hz and 1823 Hz which are obtained by 2DNRF. Around the first resonant frequency 1232 Hz, we can see a reduction. Around the second resonant frequency 1823 Hz, there are a reduction and an amplification. The predicted and measured frequencies of these three extrema and the differences between the case with pipes and the case without pipe are shown in Table 34.

At the second extremum, the SPL reduction of experimental results between the solid line and the dash line is about 3,5 dB. The SPL reduction 4.88 dB of numerical results with viscous and thermal conduction losses is close to the measurements. Compared with simulations, the frequencies of these three extrema, which are about 1200 Hz, 1800 Hz and 1900 Hz, are estimated correctly, and the variations of these three extrema are also very close. The errors are 1,15 dB, 1,38 dB and 0,76 dB. Besides, we can see similar tendencies of SPL between the experiments and the simulations. The resonant frequencies of this network, 1232 Hz and 1823 Hz, are estimated by 2DNRF. In Figure 218 we can see the variations of SPL around these two frequencies. So the resonant frequencies are estimated correctly.

Optimized network

The network to be optimized has 12 junctions. The junction positions are arranged in four columns and three rows, and their coordinates depend on end coordinates. Three types of junctions introduced before can be seen in this example. They are T junction with left branch, T junction with right branch and cross junction. The corrections of open ends can be obtained by the methods introduced before. If the ends are closed, there is no need to add the end corrections to the origin pipe lengths. All the dimension parameters of the network can be optimized within given ranges during the GA process, but for the sake of simplicity some of them are specified.

The network between the cylinder and the plane surface is optimized to get as many resonant frequencies as possible (see Figure 219). The acoustic fields of this optimized network are calculated and measured in

order to validate the proposed computational methods and GA optimization methods. When we measure the case without network, we close the pipe ends with woods.



Figure 219 : (a) Optimized network; (b) Wooden optimized network between a cylinder and a plane surface

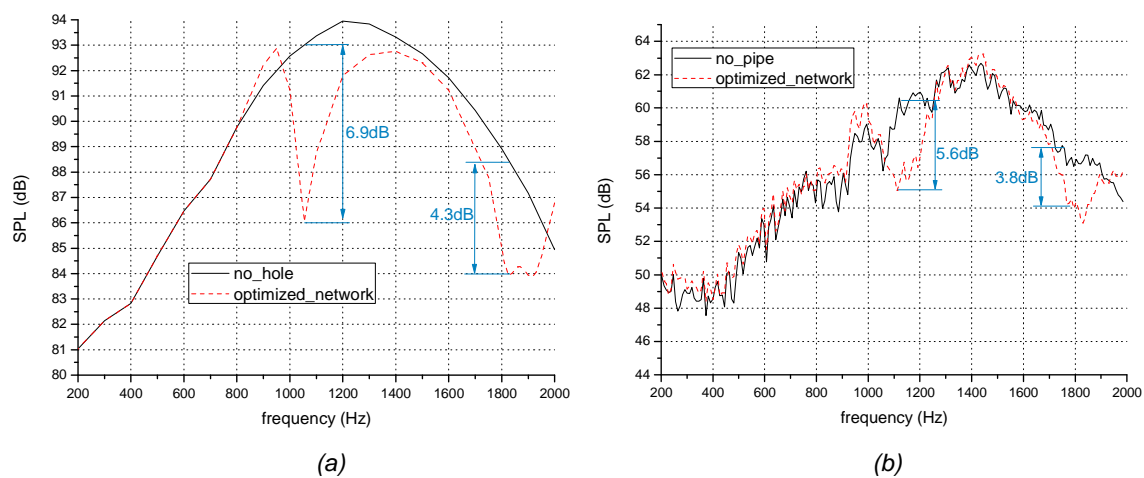


Figure 220 : SPL of the optimized network between a cylinder and a plane surface: (a) Predicted results; (b) Measured results

The predicted and measured results are shown in Figure 220. The resonant frequencies of this optimized network are 1055Hz, 1797Hz, 1799Hz and 1929Hz. The second and the third resonant frequencies are very close, so just one extremum can be seen around 1800Hz in Figure 220(a), where we can see two other extrema around 1055Hz and 1929Hz.

The variations of measured SPL are similar to the predicted results. The reductions of predicted SPL are close to the reductions of measured SPL. Around the first resonant frequency 1055Hz, we can see a maximum reduction 6.9dB in Figure 220(a), and 5.6dB in Figure 220(b). Another big reduction for the predicted results is 4.3dB around 1800Hz, and 3.8dB for the measured results which is also around 1800Hz.

If we compare this optimized network with the network in Figure 217, the results of the optimized network are better. There is no peak around 1900Hz, whereas we can see a peak around 1900Hz in Figure 220. Because the optimized network has a resonant frequency at 1929Hz, this gives reductions of SPL that we can see clearly in Figure 220(a).

Besides the flanged network given above, an unflanged network in Figure 221 is also measured in order to validate the optimization. The network targets 1400Hz. A speaker and a microphone are put near the open ends in Figure 221. The network in the optimization procedure is a 2D network, so the depth is not given. In the experiments, the depth that we use is 0,01m.

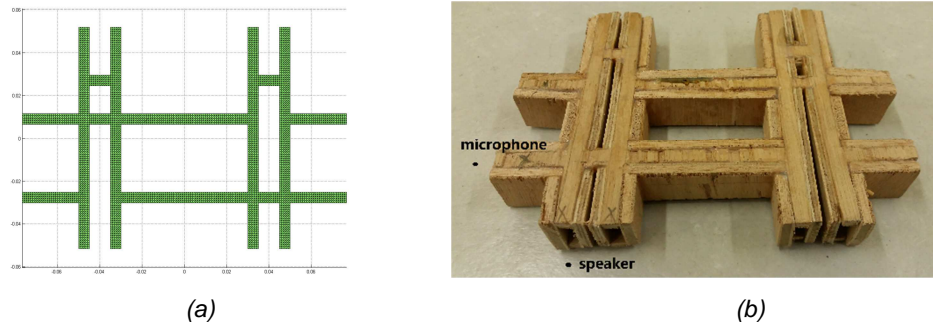


Figure 221 : (a) Optimized network without flange; (b) Wooden network for the measurements

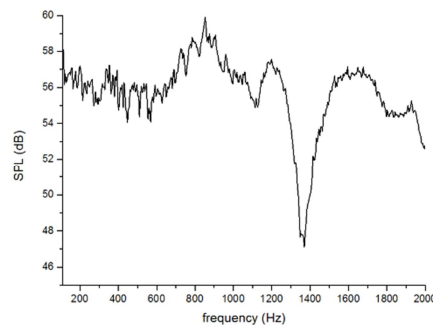


Figure 222 : Measured SPL for the optimized wooden network with the resonant frequency 1400Hz

The SPL obtained by the microphone is shown in Figure 222. We can see a deep valley at frequency 1370Hz which is close to the targeted resonant frequency 1400Hz. So the GA optimization procedure developed before can give the resonant frequencies that we want.

4.3.4.4.2. Tyre

In order to know whether the tyre treads in the contact zone have influences on the acoustic radiation of the tyre and road system, measurements of the acoustic fields for a real tyre are performed. Then the estimations of the resonant frequencies of the tyre treads in the contact zone and the calculations of the sound pressures are done by the methods proposed before.



Figure 223 : (a) Tyre with an open network; (b) Tyre with a closed network

The tyre treads in Figure 223 are very complex. There are three longitudinal pipes (pipe 1, 2 and 3) with large cross-sections, two longitudinal pipes (pipe 4 and 5) with very small cross-sections and many transverse pipes with different cross-sections. For the sake of simplicity, we only investigate the network in the middle of the contact zone. The network consists of the longitudinal pipes 1 and 2 and the large

transverse pipes between them. But there are also many small pipes connecting to the network to be studied, so we fill them with silicone. We also fill the longitudinal pipe 3 to make sure that there is no other longitudinal pipe except the pipe 1 and 2 in the network to be investigated. Two tests are performed. In the first test, the network is open. In the second test, we fill the network with silicone in the contact zone (see Figure 223). We can see that the ends of the pipes 1 and 2 are closed. These two tests are compared to study the influence of the treads on the acoustic radiation.



Figure 224 : (a) The load of five concrete cylinders; (b) The contact zone between the tyre and the road

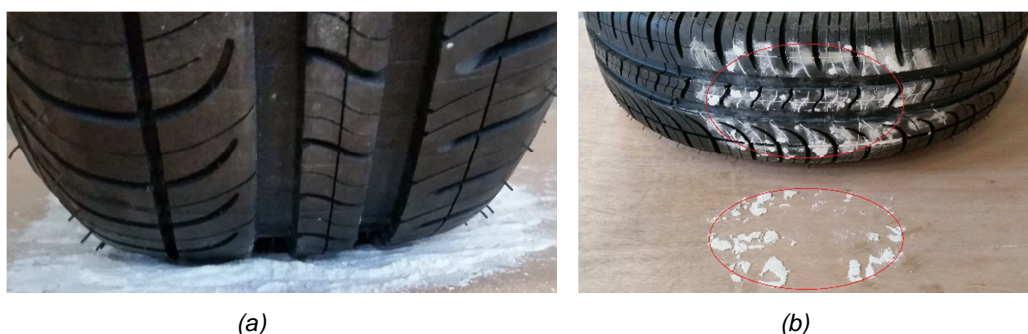


Figure 225 : (a) The tyre on the flour; (b) The contact area given by the flour

We use five concrete cylinders as the load from the car to get the flat contact zone (see Figure). In order to obtain the dimensions of the network in the contact zone, first we put the tyre on the flour for several minutes (see Figure 225). Next we move the tyre on a clean surface. Then we lay the tyre flat on the surface. We can see the elliptical contact zone which is given by the lumps of flour on the tyre or on the road. The length of the contact zone is 0,161m. The experimental setup is the same as the wooden cylinder case. The source is at $(1;0;0,06)$, and the receiver is at $(0,15;-0,005;0,005)$.

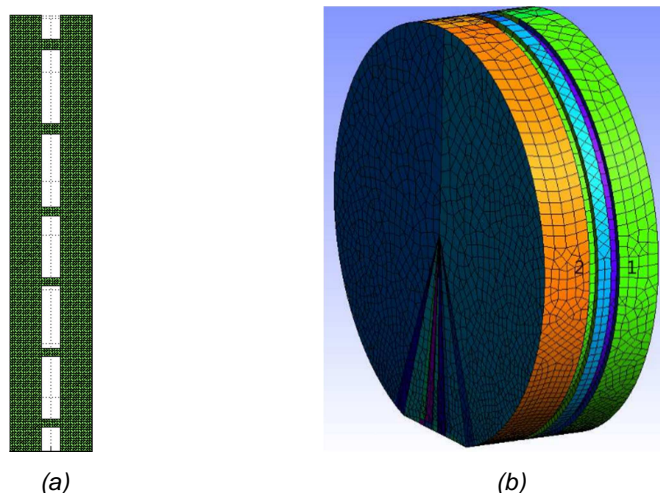


Figure 226 : (a) The simplified network; (b) The meshes of the BEM model of the tyre used in the multi-domain coupling methods

The network of the real tyre to be investigated is simplified and meshed in Figure 226. The pipes between longitudinal pipes 1 and 2 of the real tyre are modeled as straight pipes. The length of the longitudinal pipe is 0,161m. The width is 0,012m. The distance between the two longitudinal pipes is 0,019m which is very short, so we can use the same end correction for the two longitudinal pipes. The end correction of the longitudinal pipe is 0.0169m, and it is calculated by the methods introduced before. The widths of the transverse pipes are 0,003m or 0,004m. The frequency range of interest is from 1000Hz to 2000Hz. The resonant frequency of the network between 1000Hz and 2000Hz is 1734Hz. It is estimated by the program 2DNRF proposed before.

In order to predict the influence of the tyre treads on the acoustic fields of our tyre and road systems, the network is modeled as the one in Figure 226(a). The BEM meshes of the tyre can be seen in Figure 226(b). We ignore the transverse grooves on the tyre surface except the ones in the network to be studied. We only take into account the two large longitudinal pipes 1 and 2. The other longitudinal pipes are not modeled. The lateral surface in the model is a flat surface. Although the model is not the same as the real tyre, it is not very important. Because the model is used to compare the cases with and without the network and estimate the influence of the network on the acoustic fields. In the calculations of these two cases, the network to be investigated will be changed from open ends to closed ends, but the other parts keep the same. The tyre width and radius are 0,165m and 0,27m, respectively. The contact zone is 0,161m \times 0,165m. Two calculations are done. In the first calculation, the ends of the network are open. We use the multi-domain methods to solve the problem. In the second calculation, the ends of the network are closed. We use BEM to do the calculations.

The measured and predicted results at receiver (0,15;-0,005;0,005) are shown in Figure 227. The influences of the network on the acoustic fields around 1734Hz are estimated approximately. Around the resonant frequency 1734Hz of the network, we can see the variations of SPL in Figure 227(a). In Figure 227(b), we can see the similar variations around 1734Hz. But errors of reductions around 1700Hz and amplifications around 1850Hz between the measured and predicted results can be seen. These errors are due to the differences between the real tyre and the simplified model that we use.

Although above 1000Hz the agreements between the measured and predicted results in our case of the real tyre are not as perfect as the agreements in the case of the wooden cylinder and the wooden networks, we can still use our proposed model and methods to estimate the influences of the tyre treads on the acoustic fields.

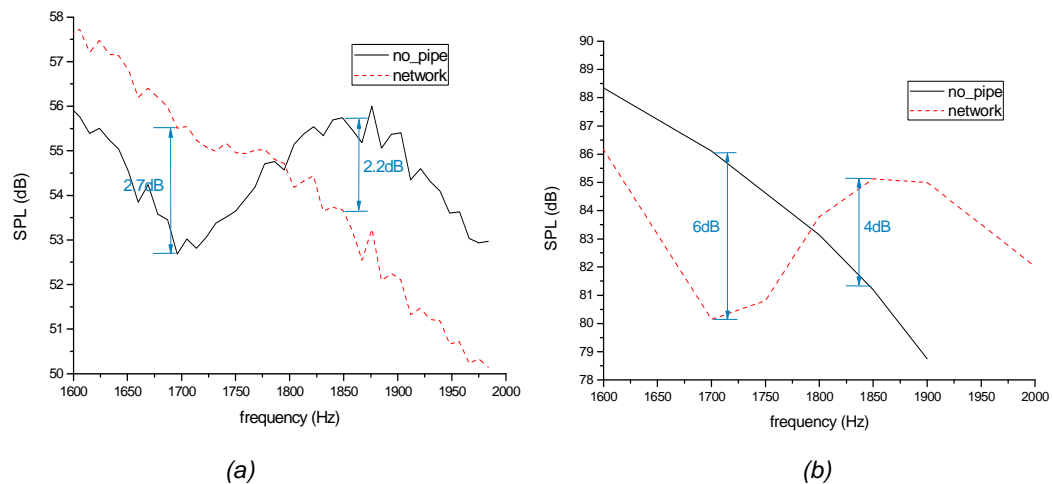


Figure 227 : (a) Measured results of the network between a tyre and a plane surface; (b) Predicted results of the network between a tyre and a plane surface

4.3.4.5. Applications to treads and textures

The pipe resonances should be investigated together with horn effects because both of them are noise radiation mechanisms. In fact, the network resonances can reduce the sound pressure at the resonance frequencies. Exterior acoustic fields are amplified by the horn between the tyre and the road, but the acoustic interactions between the exterior fields and the resonance of networks change the amplifications. In this section, the influence of treads and textures on horn effects will be investigated in detail.

There are several assumptions when modelling tyre treads and road textures: i. there are only longitudinal grooves on the tyre surface and road surface except in the contact zone, ii. there are only right-angled junctions in the networks in the contact zone, iii. the pipes in the networks have the same cross-section. An example of network in the contact zone simulating treads between the tyre and the road is meshed in Figure 228(a).

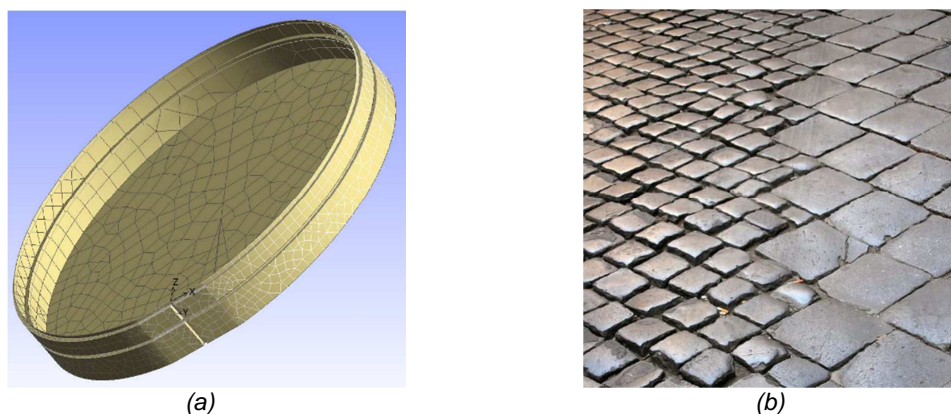


Figure 228 : (a) An example of the tyre with treads; (b) Road textures

4.3.4.5.1. Tyre treads

Tyre treads in the contact zone are in the same plane, so they can be considered as 2D networks. The multi-domain coupling method can be used to calculate the acoustic fields. The GA procedure proposed before is used to optimize the tyre treads. The number of rows and columns in the network should be given in the GA procedure. In our optimization three transverse rows and six longitudinal columns are chosen. Pipe width is 0,005m. The tyre radius is 0,27m, and its width is 0,015m.

Parallel networks

From the solid curve in Figure 229(d) we can see that there is a peak of sound pressure for the smooth tyre without network in the contact zone. The peak has a wide bandwidth. If a network in the contact zone is optimized to target the frequency of this peak, new peaks will be created around the targeted peak.

By using several parallel networks, bandwidths of the new peaks will become very narrow. In our optimizations the contact zone is divided into several parts in the transverse direction. In each part a network is inserted. The first network is used to target the original peak, and the following networks are optimized to target the peaks that the last network creates until there is no place for another new network.

Optimizations of the networks in the contact zone are performed by the GA procedure developed before. The first network targets the peak 1400Hz. In Figure 229(a), there are two symmetrical networks with an optimized resonant frequency 1376Hz. In Figure 229(d), we can see the SPL reduction 5,5dB at the resonant frequency 1376Hz. Two new peaks emerge around the frequencies 1250Hz and 1600Hz.

The next network is optimized to target 1250Hz. In Figure 229(b), there are two symmetrical networks with resonant frequencies 1240Hz besides the networks with frequency 1376Hz. In Figure 229(e) we can see the SPL reductions 6,4dB and 4,3dB at the targeted frequencies 1250Hz and 1400Hz. New peaks can also be seen around the resonant frequencies, especially a big new peak around 1050Hz.

Then we optimize a network for the new peak around 1050Hz. In Figure 229(c), we can see a new network with resonant frequencies 1034Hz, 1754Hz and 1972Hz besides the two networks optimized before. In Figure 229(f) the peak at 1050Hz shifts to 1100Hz and its bandwidth becomes narrower. In addition, we can see two more reductions 1,2dB and 4,7dB at 1050Hz and 1754Hz thanks to the new optimized network. So when optimizing the treads, we should choose networks with the maximum number of resonant frequencies.

When we compare the two curves in Figure 229(f), we can see that although the maximum pressures are close, obvious reductions of acoustic pressure are obtained especially at the targeted frequencies. Furthermore, we can calculate the global reduction between the two curves in Figure 229(f) from 1000Hz to 2000Hz by equation (50). The global reduction is 1,5dB.

$$GR = 10 \log_{10} \frac{\sum_j P_{j,smooth}^2 \Delta f_j}{\sum_j P_{j,network}^2 \Delta f_j} \quad (50)$$

where $P_{j,smooth}$ is the pressure modulus for the smooth tyre case, $P_{j,network}$ is the pressure modulus for the tread case and Δf is the frequency bandwidth.

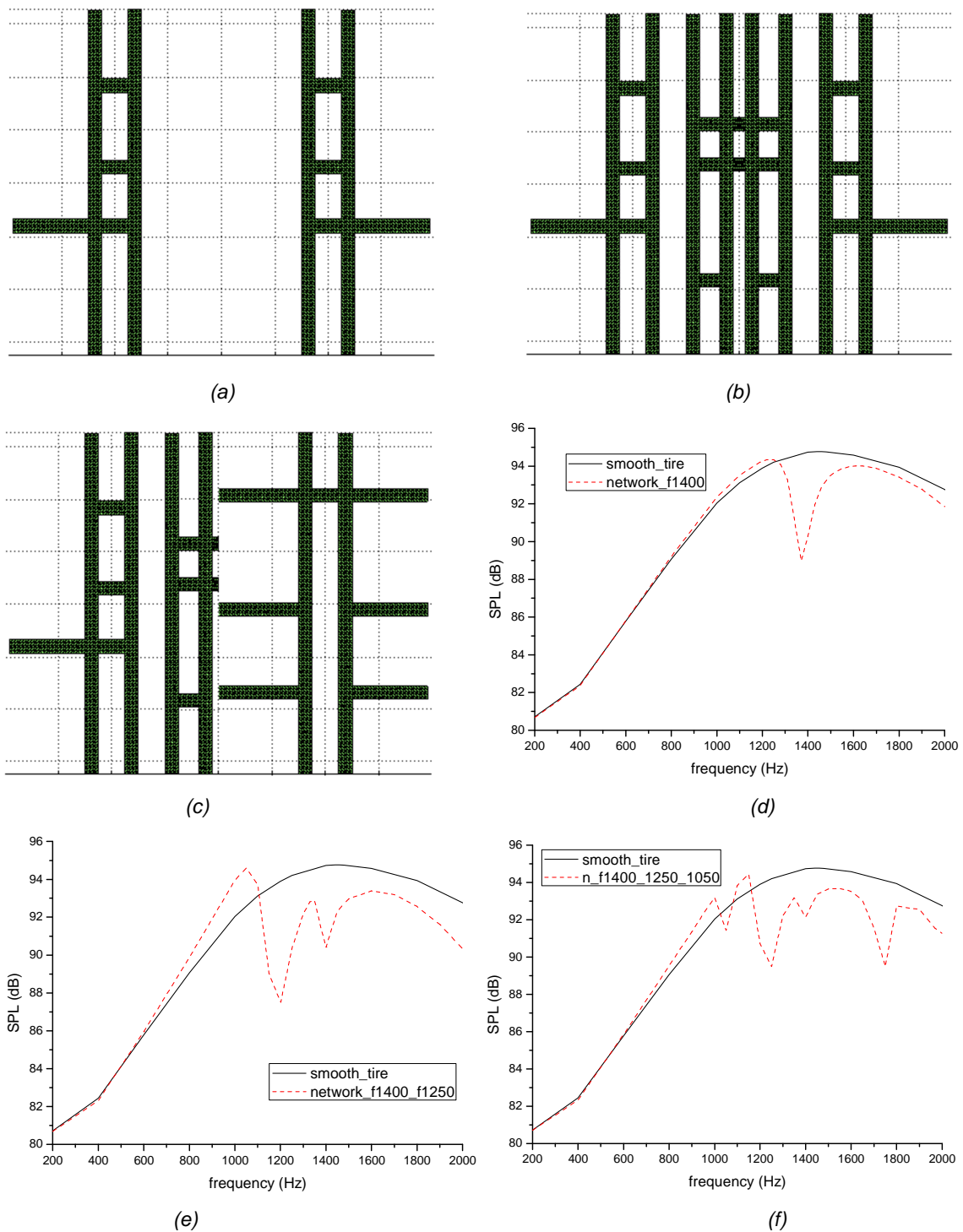


Figure 229 : Networks (including end corrections) in the contact zone with targeted resonant frequencies (The vertical direction is the rolling direction): (a) 1400Hz; (b) 1400Hz and 1250Hz; (c) 1400Hz, 1250Hz and 1050Hz (There are five closed ends in the middle of the contact zone). SPL at R for a tyre with networks in the contact zone: (d) One network targeting 1400Hz; (e) Two networks targeting 1400Hz and 1250Hz; (f) Three networks targeting 1400Hz, 1250Hz and 1050Hz

Periodic networks

Through the optimization of the parallel networks good results of reducing the sound pressure can be seen. However, the networks are not periodic networks in the contact zone. When the tyre is rolling on the road,

after a length of the contact zone emerges the optimized network. If the optimized network is a periodic network, it will emerge after a shorter rolling distance. Thus, the acoustic reductions will be better. In this section, a periodic network with the maximum number of resonant frequencies will be searched with the proposed GA procedure.

Three periodic networks with four resonant frequencies are obtained and shown in Figure 230. The acoustic pressure at receiver R is given in Figure 230. Their resonant frequencies within 2000Hz can be seen in Table 35.

Table 35 : *Four resonant frequencies for the three optimized networks*

Resonant frequency	1st	2nd	3rd	4th
Network 1	1060Hz	1486Hz	1871Hz	1961Hz
Network 2	1034Hz	1245Hz	1803Hz	1920Hz
Network 3	1046Hz	1187Hz	1722Hz	1990Hz

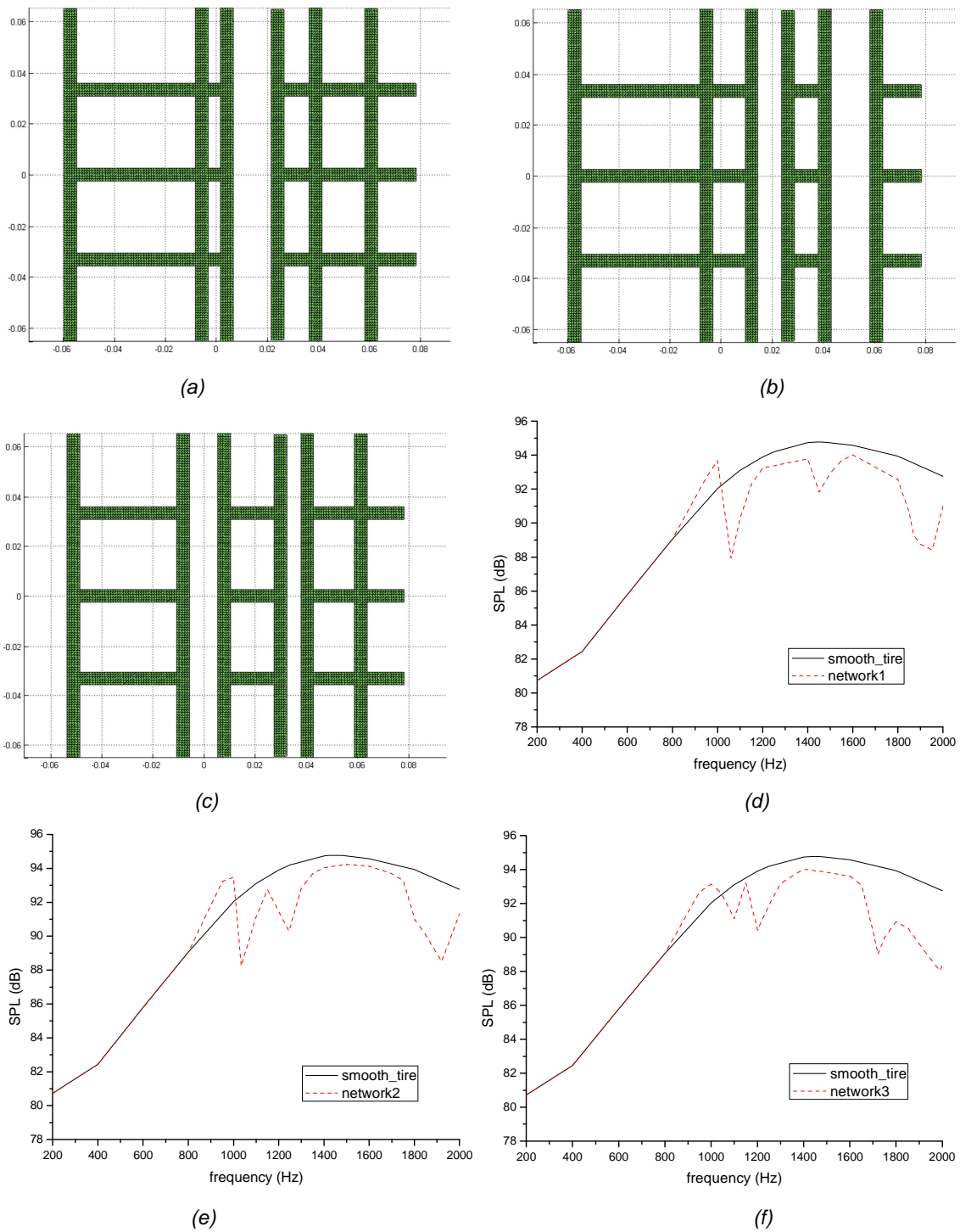


Figure 230 : Periodic networks (including end corrections) with 4 resonant frequencies (The vertical direction is the rolling direction): (a) Network 1; (b) Network 2; (c) Network 3. SPL at R for periodic networks with 4 resonant frequencies: (d) Network 1; (e) Network 2; (f) Network 3

Table 36 : SPL reductions at the resonant frequencies of the three optimized networks

Network \ RF	1st	2nd	3rd	4th
Network 1	4,8dB	3,0dB	4,3dB	4,7dB
Network 2	4,2dB	3,9dB	3,0dB	4,8dB
Network 3	2,0dB	3,5dB	5,3dB	4,8dB

Note: Resonant Frequency (RF)

From the pressure we can see a valley at every resonant frequency. Compared with a smooth tyre without network in the contact zone, optimized networks can give pressure reductions above 1000Hz, especially around the resonant frequencies. The SPL reductions at the resonant frequencies can be seen in Table 36. Besides, we can calculate the global reductions for these three networks from 1000Hz to 2000Hz by equation (50). The global reductions are 1,5dB, 1,5dB and 1,8dB. If we compare the results of three optimized networks, it is hard to say which one is better. However, we can conclude that the more resonant frequencies the network can give, the better the network is. Because around every resonant frequency we can see obvious reductions.

The networks obtained have three rows and six columns which are the parameters given in the GA optimization. Of course we can change these parameters to see if we can get more resonant frequencies and better reductions of acoustic pressure.

Tyre treads not only influence the acoustic radiations from the tyre and road system, but also are essential factors for the noise generation mechanisms, such as air-pumping and vibrations. So the optimizations of tyre treads are very complicated. When we design the tyre treads, both the noise generation and radiation mechanisms should be taken into account. But in this work, we just investigate the impact of treads on tyre and road noise from the aspect of acoustic radiation mechanisms.

4.3.4.5.2. Road textures

The road textures in Figure 228(b) can also be considered as network resonators between the tyre and the road. Smooth tyre without treads is used in this section. First the end corrections of the texture networks are calculated. Then the resonant frequencies of the different networks are estimated. For the road textures, we design several networks and choose the ones with maximum resonant frequencies. Last the acoustic radiations of the chosen networks are computed by the multi-domain coupling methods.

A fit formula of longitudinal end corrections is obtained by the methods introduced before. The end correction 0,0053m of the transverse pipe is also calculated by the methods.

$$\delta = 0.00743 + 0.24995w - 4.625w^2 + 27.7778w^3 \quad (51)$$

In this section, we investigate some simple road textures. We compare the number of the resonant frequencies of these networks and find the one with maximum number of resonant frequencies. The textures that we study have the same pattern, but different dimensions. The texture junctions are cross junctions. An example of the texture is shown in Figure 231. The texture is a periodic network in the directions of x and y axes. The network has the same symmetry axes (x and y axes) as the contact zone. There are two columns and three rows of the network in the contact zone. By changing the distances D1 and D2 between the adjacent columns and rows of the network, different networks can be obtained, which have different numbers of columns and rows in the contact zone. Two parameters, n_c and n_r , represent the number of columns and rows of the network in the contact zone, and vary in the vectors [2;4;6;8;10] and [1;2;3;4;5]. We can get 25 networks with different resonant frequencies.

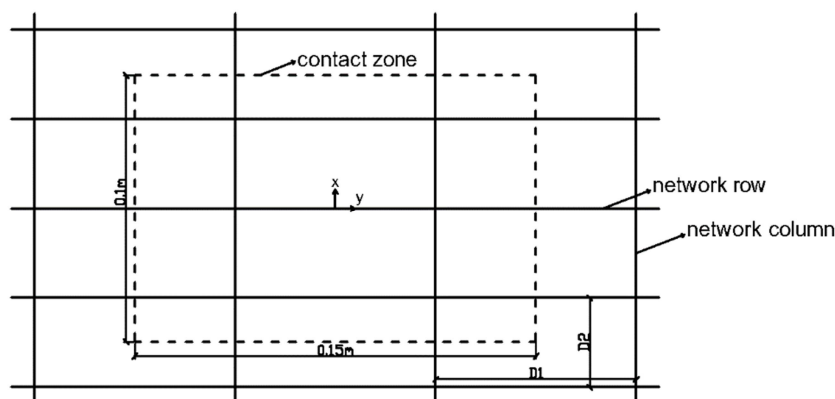


Figure 231 : Road texture in the contact zone

Table 37 : The number of resonant frequencies of networks with different number of columns and rows

Nr \ Nc	1	2	3	4	5
2	1	2	3	3	3
4	1	1	1	2	2
6	2	1	1	1	1
8	2	1	1	1	1
10	2	1	1	1	1

Note: the number of columns (Nc), the number of rows (Nr)

The resonant frequencies can be estimated by the program 2DNRF developed before. The number of resonant frequencies of the networks with different number of columns and rows are shown in Table 37. There are three networks with 3 resonant frequencies. Their resonant frequencies are given in Table 38. From the optimization of the tyre treads, we know that the networks with a maximum number of resonant frequencies give better results of reducing the acoustic radiations. So the three networks with 3 resonant frequencies are better than the others.

Table 38 : The resonant frequencies of networks with 2 columns and 3-5 rows

RF \ (Nc, Nr)	1st	2nd	3rd
(2,3)	1213Hz	1657Hz	1888Hz
(2,4)	1200Hz	1615Hz	1893Hz
(2,5)	1190Hz	1574Hz	1868Hz

Note: the number of columns (Nc), the number of rows (Nr), resonant frequencies (RF)

We choose the first texture with 3 resonant frequencies within 2000Hz in Table 38, calculate the sound pressure at (1;0;0,265) m within 2000Hz, and compare with the case of the smooth road in order to show

the influence of the road texture on the acoustic radiation. In this texture, there are two columns and three rows.

The multi-domain methods proposed before are used to do the calculations. The BEM meshes and the results are shown in Figure 232. Around the three resonant frequencies we can see the clear SPL reductions 2,1dB, 2,9dB and 1dB.

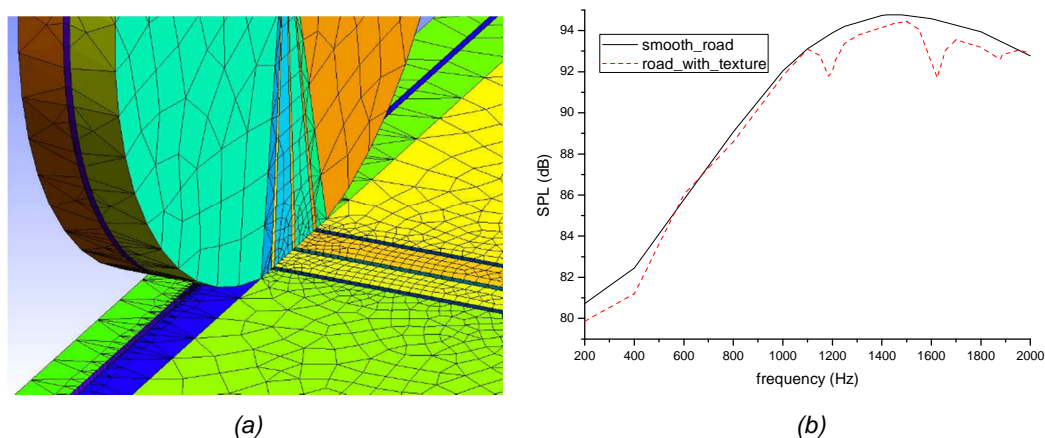


Figure 232 : (a) Meshes of half the boundary element model of the texture with 2 columns and 3 rows under the smooth tyre; (b) SPL at R (1,0,0.265)m for the network with 2 columns and 3 rows

4.3.4.6. Conclusions

The horn effect and the pipe resonances, which are two noise radiation mechanisms, should be taken into account in the same model. New designs of the tyre treads and road texture can be found for the noise reduction. The tyre treads and road textures can be seen as networks in the contact zone between the tyre and the road. Around the resonant frequencies, the amplification of the sound pressure by the horn effect can be reduced by the networks. So numerical methods for the calculation of the resonant frequencies of the network are developed. Since the network has open ends for which the end correction should be taken into account when we calculate the resonant frequencies, numerical methods for the determination of the end corrections of the pipes with arbitrary flanges are proposed. In order to reduce the amplification of the horn effect around the wanted resonant frequencies, an optimization method of the network structure based on the genetic algorithm is developed. By optimizing the junction types and the positions of the network, we can get the network with wanted resonant frequencies. The more resonant frequencies the network has within 2000Hz, the more reductions of the amplifications can be obtained. Therefore, we can also use the optimization methods to design networks with a maximum number of resonant frequencies within 2000Hz. The tyre/road system and the networks in the contact zone can be considered as flanged networks. In order to estimate the value of the reduction, multi-domain coupling methods are developed. The network in the contact zone is a two dimensional structure.

The methods proposed in this work are validated with measurements. First we use a wooden cylinder and several wooden networks to compare the predicted results obtained by the methods introduced before and the measured results. The availability and effectiveness of the methods are proved by good agreements. Then a real tyre is measured and calculated. The predicted results agree with the measured results. Based on the results that we have, we can conclude that the resonances of the networks can reduce the amplification around the resonant frequencies, and the methods that we developed can be applied to the design and optimization of the tyre treads and the road textures. The systematic analysis tools developed for the flanged networks are used for the real tyre and road. By optimizing the tyre treads, multiple reductions of the amplification of the horn effect can be seen. Two types of optimized tyre treads are obtained. In the first optimization, we optimize the treads for the targeted resonant frequencies, and for the second type the treads are optimized to get the periodic structures with the maximum number of resonant frequencies. Since the tyre treads also influence other noise generation mechanisms, such as air-pumping and tyre vibration, we can not give the optimal tyre treads from the aspect of noise radiation. The systematic analysis tools should be used together with other design tools for other mechanisms. Otherwise, the networks that we design maybe cause other enhancement of the noise, for example tyre vibrations.

For the road textures, we can get similar conclusions as for the tyre treads, because both of them can be seen as networks in the contact zone. So only the dimension of the road bricks in the contact zone is studied. Then we choose the texture with a maximum number of resonant frequencies to estimate the influence on the horn effect. We can see the reductions of amplifications of the horn effect by the texture around the resonant frequencies.

4.4. La DEUFRABASE

4.4.1. Introduction

Outre l'objectif de développer des revêtements de chaussée optimisés, nous rappelons que le projet ODSurf prévoit la modernisation de la DEUFRABASE¹⁵ développée précédemment lors du projet P2RN. En effet, cette dernière n'offre pas la possibilité d'ajouter de nouveaux revêtements de chaussée, de nouvelles géométries, de nouveaux indicateurs acoustiques, de manière simple et optimisée.

Afin de donner un caractère extensible à la DEUFRABASE à moindre coût, il est important de choisir un outil de développement adapté à un tel objectif.

La technologie Django a donc été retenue comme outil de développement de la DEUFRABASE. Les raisons d'un tel choix sont données dans la section 4.4.3.

Le présent rapport liste dans un premier temps les définitions et les notions de base facilitant sa lecture et sa compréhension. Les étapes du calcul des indicateurs acoustiques sont dans un deuxième temps présentées. Cet outil de calcul dont certaines données d'entrée sont stockées dans une base de données, implique l'administration de cette dernière. L'administration et ses interfaces sont décrites dans une autre section. Enfin des perspectives en lien avec la DEUFRABASE seront offertes au lecteur.

4.4.2. Définitions

- **Environnement** : Le terme environnement employé dans la suite du présent rapport est synonyme de site internet. Le terme « deufrabase » sans majuscule désigne le site internet avec une approche technique.
- **Application** : Une application est un sous-ensemble fonctionnel d'un site développé en Django. Un site Django peut être vu comme une somme d'applications. Chaque application est sauvegardée dans un dossier spécifique. Par exemple, notre développement a consisté à créer l'application '*calculations*' permettant le calcul des indicateurs acoustiques LA_{eq} , L_{den} et LA_{eq} horaire.
- **Utilisateur** : Un utilisateur est une personne accédant à la DEUFRABASE par le biais d'un navigateur internet.
- **DEUFRABASE** : DEUFRABASE n'est pas seulement une base de données car elle comporte un outil de calculs acoustiques. La DEUFRABASE est un outil web.
- **deufrabase.ifsttar.fr.** : URL du serveur hébergeant l'outil web DEUFRABASE.
- **MVC** : Architecture logiciel Modèle-Vue-Contrôleur.
- **Modèle** : Le terme « modèle », lorsqu'il est employé dans un contexte Django, est le synonyme de table d'une base de données.
- **Action d'une page HTML** : L'action d'une page HTML est déclenchée lorsque l'utilisateur clique sur le bouton le menant à une nouvelle page.
- **Données trafic** : Nous désignons dans le reste du document par « données trafic » le nombre de voie par direction, la vitesse des voitures, le nombre de véhicules par direction ainsi que le pourcentage de camions.

¹⁵ <http://deufrako.bast.de/>

4.4.3. Notions de base

4.4.3.1. Pourquoi Django ?

Notre choix s'est porté sur le « framework » Django pour les raisons suivantes :

- Django présente comme caractéristique la flexibilité d'étendre aisément le périmètre du site internet développé, notamment grâce au concept d'applications.
- Django permet le développement 'open source' de solutions web informatiques d'une manière optimisée¹⁶.
- Le langage de programmation de Django est le Python qui est utilisé par l'équipe du LAE (Laboratoire d'Acoustique Environnementale).
- La communauté des développeurs Django est large et active.

4.4.3.2. Principes fondamentaux de Django

Il est important de préciser les principes de Django applicables au projet de rénovation de la DEUFRABASE :

- Si le LAE souhaite à l'avenir élargir le périmètre de la DEUFRABASE, Django offre la possibilité d'ajouter simplement de nouvelles applications à un environnement existant¹⁷.
- Du fait de son langage Python, un site Django peut naturellement intégrer des scripts Python existants.

Exemple : *from calculations.acoustics.LAeqLden import LAeq,Lden*

Les classes LAeq et Lden du script LAeqLden.py sont importées dans un script Django. Le script LAeqLden.py est situé au niveau calculations/acoustics de l'arborescence du site deufabase. Le lecteur peut se reporter au paragraphe 4.4.7 pour plus de détails.

- Django consiste essentiellement à gérer les objets suivants : des URL's, des vues, des formulaires, des gabarits et des modèles. Ces concepts sont présentés plus bas.

4.4.3.3. Philosophie de développement

Le concept des applications Django apporte donc une certaine souplesse de développement. De plus, l'utilisation d'une base de données offre la possibilité d'étendre le contenu d'un site. Un site internet créé avec Django intègre de base la structure de données SQLite.

Nous avons aussi précisé que la DEUFRABASE n'est pas seulement une base de données mais un outil web de calcul d'indicateurs acoustiques. Il est donc légitime de se demander comment ajouter, à l'avenir, un autre indicateur acoustique. L'approche suivante est donc proposée :

- Dans le cas où la DEUFRABASE est à compléter d'un nouvel indicateur acoustique se basant sur des données d'entrée communes à celles du LA_{eq} et du L_{den}, soient les données de géométrie, de revêtements de chaussée et de trafic, alors l'application développée 'calculations' est censée accueillir le plus aisément possible ce nouvel indicateur.
- Dans le cas où le nouvel indicateur acoustique n'a pas les mêmes données d'entrée, le développeur du site aura donc la liberté de créer une nouvelle application au sein du site deufabase.

Nous aborderons plus précisément ce point dans la section des perspectives.

¹⁶ L'optimisation se situe au niveau de la génération assistée de l'arborescence du site, du fonctionnement suivant le modèle d'architecture logiciel Modèle-Vue-Contrôleur, la génération des pages HTML et l'intégration d'un système de base de données.

¹⁷ La commande *startapp* exécuté dans l'environnement « deufabase » crée une nouvelle application. Pour plus de détails, se reporter au site officiel de Django : <https://docs.djangoproject.com/fr/1.8/intro/tutorial01/>.

Tout au long du développement du site, une attention particulière a été donnée afin de faciliter l'intégration de futurs indicateurs acoustiques, et donc de maintenir la mise à jour de la DEUFRABASE aux avancées de la recherche acoustique en lien avec le bruit de trafic péri-urbain et urbain.

4.4.3.4. Principes de fonctionnement de Django

Le but de cette section est d'offrir au lecteur la compréhension du principe de fonctionnement du 'framework' Django basé sur le modèle d'architecture logiciel Modèle-Vue-Contrôleur.

Au paragraphe 4.4.7 on donne une représentation des différentes briques, et de leurs liens, lorsqu'un tel modèle est appliqué à la DEUFRABASE.

Les URL's : *urls.py*

Les URL's sont deux types :

- Les URL's des applications de l'environnement deufrabase renseignent les adresses de ces dernières. Celles-ci sont définies dans le fichier `urls.py` du dossier de l'environnement `deufrabase/deufrabase`.
- Les URL's d'une application renvoient sur ses différentes vues. Ces adresses sont situées dans un autre fichier `urls.py` du dossier de l'application `deufrabase/calculations`. L'adresse de la vue 'Geometry' par laquelle commence le calcul, est `deufrabase.ifsttar.fr/calculations/geometry`.

Les vues de l'application : *views.py*

Une vue Django est donc liée à une URL. Une vue définit le contenu de l'information présentée dans une page web, suivant un contenant choisi. Une vue renvoie sur un gabarit de format html (voir la section suivante à propos des gabarits), afin de permettre son affichage.

Le contenu de la page peut inclure des informations envoyées par une autre page, et/ou stockées dans une base de données. L'utilisateur peut également saisir des données à travers cette page. Le contenant est un formulaire Django défini dans le fichier `forms.py`.

Le contenu et le contenant d'une vue sont appelés le contexte.

Les formulaires de l'application : *forms.py*

Les formulaires Django sont donc liés aux vues. Les formulaires correspondent au contenant des vues au moyen de champs de formulaire. Ces champs sont de types divers et variés (texte, entier, liste, options, fichiers, etc...).

Les champs de formulaires peuvent servir à la saisie de données dans la base de données du site.

Nous précisons aussi qu'un formulaire peut être construit à partir d'un modèle Django par l'utilisation de la classe Django `ModelForm`.

Les gabarits : *HTML*

Les gabarits sont les fichiers HTML dans lesquels sont déversés le contexte d'une vue. Ceci est une optimisation importante de Django permettant de minimiser le développement HTML. En effet, plutôt que de développer spécifiquement chacun des gabarits en HTML, chaque vue Django est développée en langage Python, et est liée à un gabarit HTML.

Un gabarit peut aussi inclure des fonctions Javascript dans le cas où l'on souhaite élargir le périmètre fonctionnel de Django.

Enfin, nous bouclons la série de liens entre les diverses briques, par celui entre le gabarit et l'URL. Comme l'illustre la brique html de l'annexe 1, une URL est associée à la variable action ('*mynexturl*' dans ce cas). Cela pour effet d'orienter l'utilisateur vers cette URL en cas d'action sur cette page HTML.

Les modèles de l'application : *models.py*

Le fichier *models.py* centralise le squelette de la base de données du site. La base de données de type SQLite est composée de modèles incluant des champs de modèle. Nous retrouvons la diversité de type des champs de formulaire. Il est possible d'exécuter une requête sur les modèles de la base de données depuis n'importe quel script de l'environnement Django. Les données sont stockées dans le fichier *db.SQLite3* sauvegardé à la racine du site.

L'administration du site : *admin.py*

Le fichier *admin.py* est utile à la définition des pages d'administration de la base de données. Cela consiste à importer les modèles nécessaires à administrer, et à les présenter sous une certaine forme.

4.4.4. Développement du calcul des indicateurs acoustiques

Le calcul des indicateurs acoustiques LA_{eq} , L_{den} et LA_{eq} horaire est exécuté à partir de données géométriques, de revêtements de chaussée et de trafic, sauvegardées dans un modèle de la base de données. Au cours des 3 étapes de saisie, l'utilisateur alimente le modèle *InputValues* permettant l'obtention des valeurs des indicateurs.

Afin d'afficher les résultats, le calcul acoustique s'appuie sur les données saisies par l'utilisateur. Le calcul acoustique peut donc s'exécuter sur la base :

- du fichier de données associé à la géométrie sélectionnée, soit le fichier d'atténuation ;
- de fichiers de données associés aux revêtements sélectionnés, soit le fichier spectre. L'utilisateur peut également télécharger ses propres fichiers spectre de voitures et de poids lourds ;
- des valeurs saisies telles que le nombre de véhicules par voie et le pourcentage de camions ;
- d'un fichier trafic comportant les pourcentages horaires des voitures et des poids lourds. L'utilisateur peut choisir d'utiliser ses propres fichiers de trafic voitures et poids lourds, comportant 24 nombres horaires de véhicules.

Dans le cas d'un téléchargement, les fichiers de l'utilisateur passent par le pare-feu du serveur de la DEUF¹⁸BASE afin de vérifier leur intégrité numérique. De surcroît, des tests¹⁸ de validation du contenu de ces fichiers ont été développés afin de garantir l'exécution du calcul avec des données extérieures au site. Les scripts de ces tests sont sauvegardés dans le dossier '*uploadtests*' de l'arborescence du site présentée à l'annexe 1. Les fichiers utilisateurs sont ainsi sauvegardés sur le serveur d'une manière intelligente.

4.4.4.1. Géométries – Étape 1

L'utilisateur sélectionne une géométrie parmi une liste d'option de géométries sauvegardées dans le modèle '*Geometry*' (cf. Figure 233). À l'issue de cette étape, la valeur de la géométrie est enregistrée dans le modèle '*InputValues*'. Cet enregistrement permet à la DEUF¹⁸BASE de récupérer les valeurs d'atténuation associées à la géométrie sélectionnée au moment de l'exécution du calcul acoustique.

¹⁸ Les fichiers spectres doivent valider 3 tests concernant le nombre de lignes, le type des valeurs ('*float*') et les bandes de tiers d'octave de 100 à 1 000 Hz. Les fichiers trafic doivent valider les 2 premiers tests mentionnés précédemment.

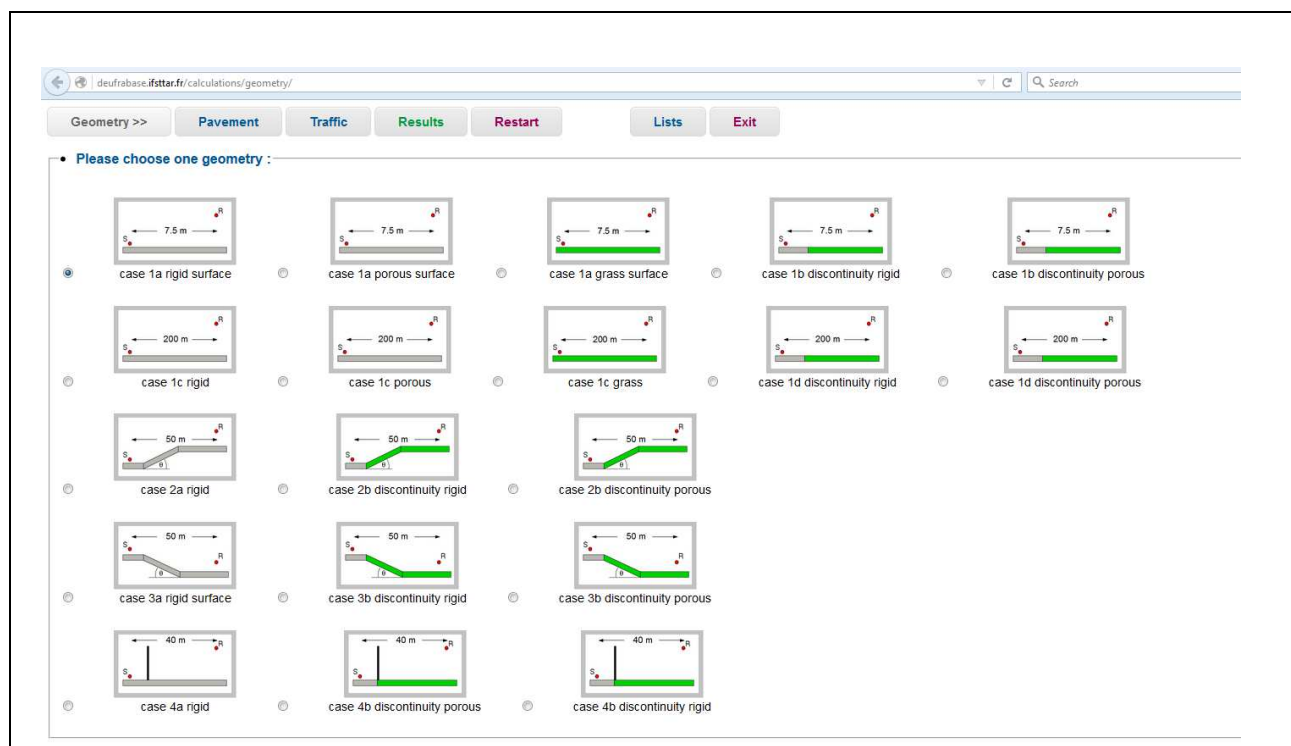


Figure 233 : Choix des géométries

4.4.4.2. Revêtements de chaussée – Étape 2

L'utilisateur sélectionne au moins un revêtement parmi la liste proposée par défaut à laquelle s'ajoute l'option du revêtement de l'utilisateur (cf. Figure 234). En effet, si l'utilisateur sélectionne l'option '*My own pavement spectrum*', ce dernier peut télécharger ses propres fichiers de spectres de voitures et de camions. Afin de faciliter le formatage des données de revêtement, il est offert à l'utilisateur la possibilité de télécharger des modèles de fichiers suivant la même structure que celle des fichiers de la DEUFRABASE. Il lui suffit de cliquer sur '*Get templates*'.

À l'issue de cette étape, les valeurs suivantes sont enregistrées dans le modèle *InputValues* :

- la liste des revêtements de chaussée ;
- l'état de l'option '*Own Pavement*', à savoir si l'utilisateur a chargé ses propres fichiers de spectres sur le serveur de la DEUFRABASE.

Cet enregistrement permet à la DEUFRABASE de récupérer les valeurs des spectres associés aux revêtements de chaussée sélectionnés au moment de l'exécution du calcul des indicateurs.

deufrabase.ifsttar.fr/calculations/pavement/

Search

Geometry Pavement >> Traffic Results Restart Lists Exit

• Please choose one or more pavements :

<input type="checkbox"/> BBDr 0/10	<input type="checkbox"/> BBTM 0/14	<input type="checkbox"/> ES 10/14	<input type="checkbox"/> SMA 0/8 LA
<input type="checkbox"/> BBDr 0/14	<input type="checkbox"/> BBTM 0/6-type 1	<input type="checkbox"/> ES 6/10	<input type="checkbox"/> SMA 0/8 S
<input type="checkbox"/> BBDr 0/6	<input type="checkbox"/> BBTM 0/6-type 2	<input type="checkbox"/> GA 0/5	<input type="checkbox"/> WB 0/5
<input type="checkbox"/> BBM 0/10	<input type="checkbox"/> BBTM 0/8-type 1	<input type="checkbox"/> GA 0/5 LA	<input type="checkbox"/> WB 0/8
<input type="checkbox"/> BBSG 0/10	<input type="checkbox"/> BBUM 0/10	<input type="checkbox"/> OPA 0/8	<input type="checkbox"/> ZBJT
<input type="checkbox"/> BBSG 0/14	<input type="checkbox"/> BBUM 0/6	<input type="checkbox"/> SMA 0/11	<input type="checkbox"/> ZBJT 0/16 Kamm
<input type="checkbox"/> BBTM 0/10-type 1	<input type="checkbox"/> BC	<input type="checkbox"/> SMA 0/11 S	<input type="checkbox"/> ZBKR 0/16
<input type="checkbox"/> BBTM 0/10-type 2	<input type="checkbox"/> ECF	<input type="checkbox"/> SMA 0/5 LA	<input type="checkbox"/> ZWOPA 0/8

• Or check "My own pavement" to upload your own pavement spectrum :

☐ My own pavement spectrum

Please upload the passenger cars spectrum :

Browse... No file selected. [Get Templates](#)

Please upload the heavy trucks spectrum :

Browse... No file selected.

Geometry selected : 1a_rigid

Figure 234 : Choix des revêtements

Précision sur la vitesse « utilisateur »

La vitesse des voitures et des poids lourds sont des données d'entrée du calcul des indicateurs LA_{eq} et L_{den} . Dans un cadre d'acoustique péri-urbaine, la vitesse des poids lourds est fixée à 80 km/h. Il reste cependant la possibilité de donner à l'utilisateur de renseigner la vitesse des voitures. Les spectres des voitures de la DEUFRABASE ont été mesurés soit à 90 km/h, soit à 110 km/h. Par défaut, l'utilisateur a donc le choix entre ces 2 vitesses.

D'autre part, il est tout à fait envisageable que les spectres téléchargés par l'utilisateur proviennent d'une mesure effectuée à une vitesse différente de ces vitesses.

Dans le cas où l'utilisateur inscrit ses propres données de spectre dans une liste des revêtements par défaut, la vitesse de calcul sera automatiquement sélectionnée parmi une liste de 90 et de 110 km/h. Dans le cas où l'utilisateur saisit seulement l'option 'My own pavement spectrum', la vitesse de calcul est automatiquement retrouvée à partir du nom du fichier téléchargé. Les conditions de nommage du fichier sont les suivantes. Le nom des fichiers commencent par le caractère 'v' suivie de la valeur de la vitesse. Par exemple l'outil détermine une vitesse de 50 km/h si le nom du fichier présente le préfixe 'v50' suivi du séparateur '_'. Dans notre exemple, le fichier se nommerait 'v50_MyOwnPavement.txt'.

4.4.4.3. Trafic – Étape 3

deufrabase.istar.fr/calculations/traffic/

Geometry Pavement Traffic >> Results Restart Lists Exit

• Please input traffic data :

1 lane per direction 2 lanes per direction

Please select personal car speed : 110 km/h

Number of vehicles per direction : 20000

Heavy trucks percentage : 15 %

• Or check "My own traffic" to upload your own traffic data :

☐ My own traffic data

Please upload the passenger cars traffic data

Browse... No file selected. Get Templates

Please upload the heavy trucks traffic data

Browse... No file selected.

Geometry selected : 1a_rigid

Pavement(s) selected :

- BBDr_0_10
- BBTM_0_10-type_1
- BBUM_0_10

Figure 235 : Choix des conditions de trafic

L'utilisateur sélectionne ou saisit les données trafic que sont le nombre de voie par direction, la vitesse des voitures, le nombre de véhicules par direction et le pourcentage de camions (cf. Figure 235).

L'utilisateur peut sélectionner l'option 'My own traffic data' et télécharger ses propres fichiers trafic de voitures et de camions. À ce moment-là, seule la vitesse reste à renseigner.

Afin de faciliter le formatage de ses données, il est offert à l'utilisateur la possibilité de télécharger des modèles de fichiers suivant la même structure que celle des fichiers trafic de la DEUFRABASE. Il lui suffit de cliquer sur 'Get templates'.

À l'issue de cette étape, les valeurs suivantes sont enregistrées dans le modèle *InputValues* :

- les données trafic ;
- l'état de l'option 'Own Traffic', à savoir si l'utilisateur a chargé ses propres fichiers trafic sur le site de la DEUFRABASE.

Cet enregistrement permet à la DEUFRABASE d'alimenter le code de calcul des données trafic nécessaires à l'obtention des résultats.

4.4.4. Résultats – Étape 4

Une fois les données de géométrie, de revêtements de chaussée et de trafic renseignées, la DEUFRABASE a tous les éléments pour afficher les résultats des indicateurs sous une forme graphique interactive. Chaque indicateur comporte un graphique regroupant les valeurs associées aux revêtements de chaussée sélectionnés.

Résultats du LA_{eq} et du L_{den}

L'exemple de graphique de la Figure 236 présente, pour une sélection de revêtements, les 24 valeurs horaires du LA_{eq} auxquelles vient se rajouter celle du L_{den} . L'utilisateur peut d'une manière agréable désélectionner et sélectionner les revêtements à afficher. Il est intéressant de préciser que l'utilisateur peut exporter le graphique dans un fichier image, PDF ou de données (format CSV ou Excel). L'exemple choisi montre que la DEUFRABASE permet de mettre sur un même support les indicateurs acoustiques liés aux revêtements de la DEUFRABASE (dans notre cas BBDr 0/6, OPA 0/8, SMA 0/8 LA), mais aussi à son propre revêtement 'My Pavement'. Nous remarquons également que les données d'entrée du calcul sont reprises dans la description du graphique. Nous voyons donc que ces résultats sont associés à la géométrie '1a_rigid', avec pour données trafic 10 000 véhicules, 10% de poids lourds et 90 km/h pour la vitesse des voitures.

La précédente version de la DEUFRABASE ne permettait pas d'afficher ces 2 indicateurs pour un ensemble de revêtements de chaussée. En effet, l'utilisateur ne pouvait sélectionner qu'un seul revêtement de chaussée à l'occasion du calcul du LA_{eq} , et sélectionner un ensemble de revêtements de chaussée pour le calcul du L_{den} .

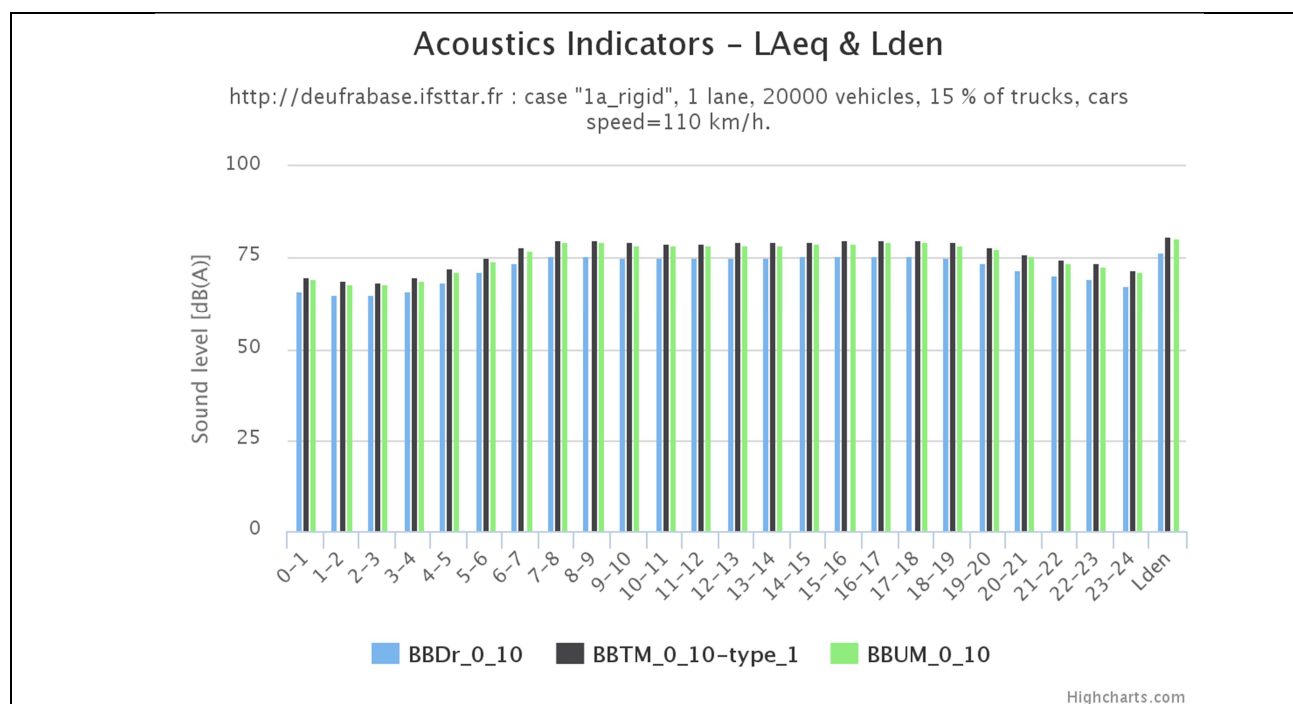


Figure 236 : Tracé de la répartition horaire de l'indicateur acoustique LA_{eq} et de l'indicateur L_{den}

Résultats du L_{den}

Le graphique de la Figure 237 correspond à la dernière colonne du graphique précédent. Il est légitime de s'interroger sur la redondance de l'information. Lors de la version précédente de la DEUFRABASE, cet

indicateur était présenté dans un graphique à part. La nouvelle DEUFRABASE a fusionné les graphiques des LA_{eq} et des L_{den} tout en conservant le graphique existant avec uniquement le L_{den} .

Nous précisons également que le placement du pointeur de la souris sur une barre du graphique fait apparaître les valeurs associées.

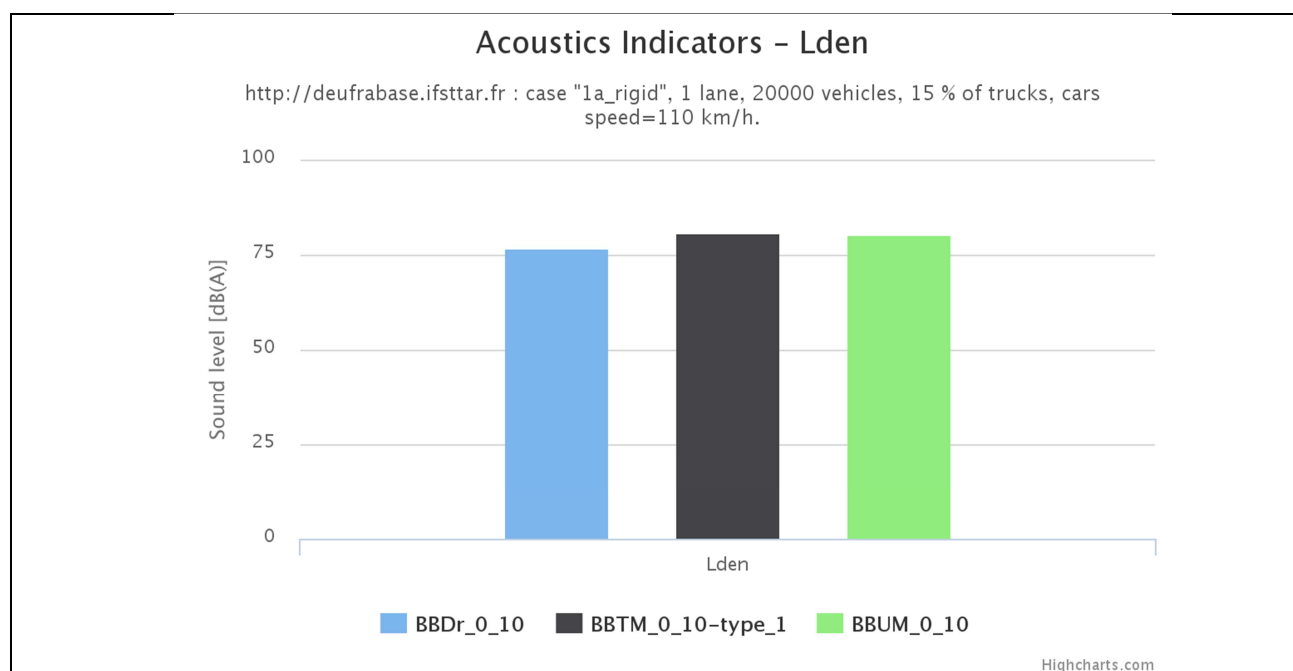


Figure 237 : Tracé de l'indicateur L_{den} pour divers revêtements

Résultats du LA_{eq} horaire :

Cet indicateur acoustique présente les valeurs d'un LA_{eq} sur une durée d'une heure par bande de tiers d'octave de 100 à 4000 Hz, avec un certain nombre de véhicules et un pourcentage de poids lourds, pour une certaine vitesse de voitures (cf. Figure 238).

Cas de données trafic téléchargées par l'utilisateur

Dans le cas où l'utilisateur charge dans la DEUFRABASE ses propres données de trafic, soit un nombre de voitures et de poids lourds pour chacune des 24 heures de la journée, les deux données trafic mentionnées plus haut (nombre de véhicules et pourcentage de poids lourds) ne sont pas renseignées. Il n'est donc pas techniquement possible de calculer le LA_{eq} horaire dans ce cas-là. Cela explique l'absence de ce graphique dans le cas où les données trafic sont celles de l'utilisateur. Il serait toutefois possible à l'avenir de calculer la moyenne horaire des voitures et des camions, et donc les deux données trafic manquantes.

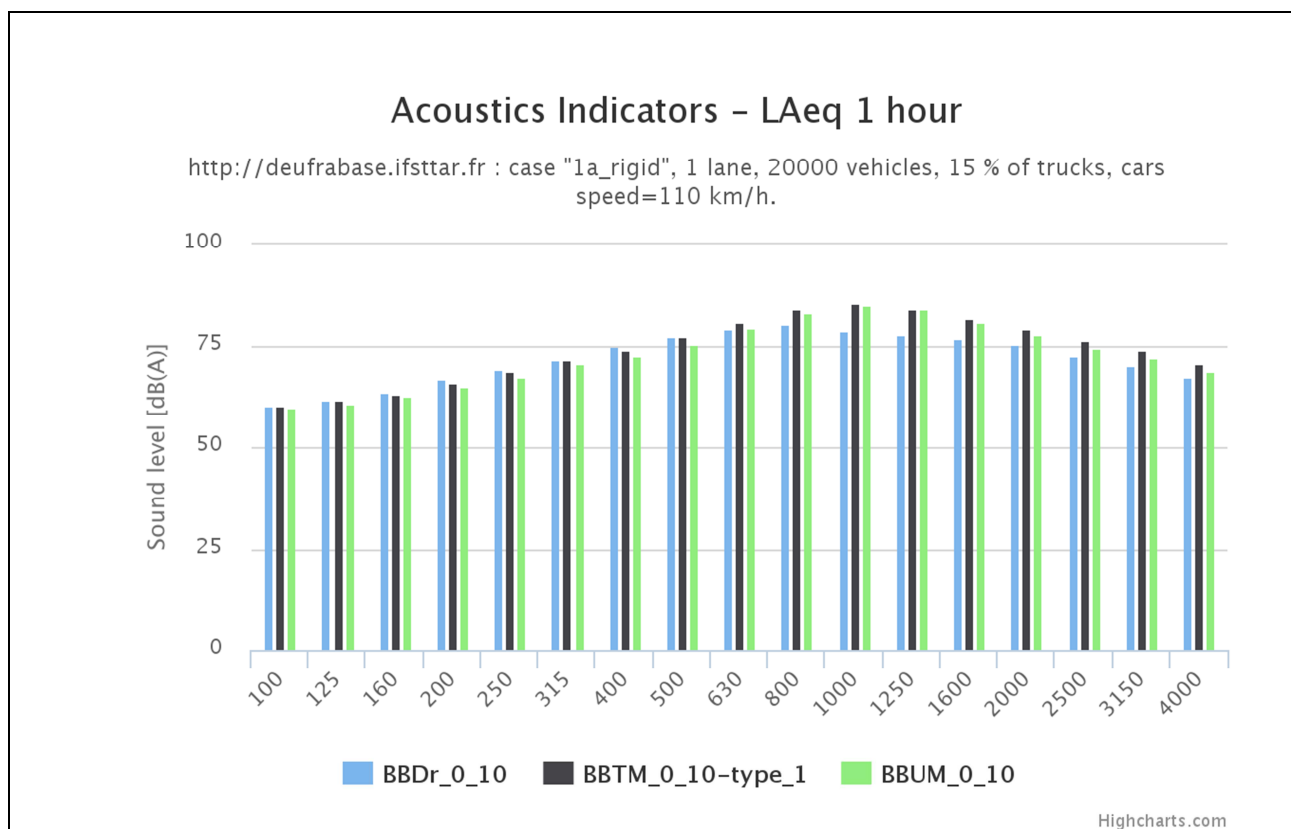


Figure 238 : Tracé du spectre horaire du LAeq pour divers revêtements

4.4.5. Administration de la base de données

La base de données de la DEUFRABASE utilise SQLite 3 comme moteur de base de données. Les données des géométries et des revêtements de chaussée pointent vers des fichiers hérités de la version précédente de la DEUFRABASE. La base de données comporte également des fichiers de données tels que les spectres des revêtements, et les fichiers trafic. Tous les fichiers mentionnés sont sauvegardés sur le serveur dans un dossier de l'environnement Django.

La mise en place d'une base de données implique son administration. En effet, l'ajout, la modification ou la suppression de nouvelles géométries, de nouveaux revêtements ou de nouvelles données trafic, nécessitent la mise à disposition d'outils de gestion de bases de données.

L'administrateur a donc la possibilité d'ajouter directement des nouveaux enregistrements aux modèles Django *via* le site d'administration du site. L'administrateur peut également lancer des scripts Python s'exécutant depuis un shell Django. Ces scripts déplacent et centralisent les fichiers de données tout en alimentant la base de données.

Nous voyons dans les paragraphes suivants ces outils de gestion.

4.4.5.1. Le site de l'administration

Le site de l'administration est accessible par l'adresse : deufrabase.ifsttar.fr/admin. Un mot de passe est à renseigner.

Ce site présente les modèles Django de la façon suivante (cf. Figure 239) :

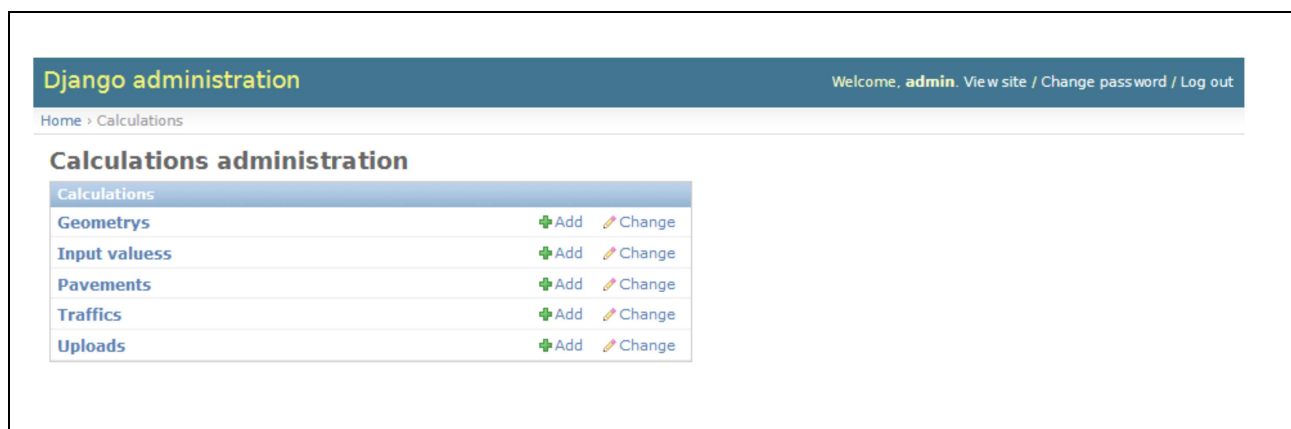


Figure 239 : Administration Django

L'administrateur a donc le loisir de consulter les données, ou de mener les actions nécessaires au maintien des données.

Modèle « Geometrys »

Ce modèle liste les différentes géométries présentées dans la vue de l'étape de sélection de la géométrie. Chaque enregistrement de la liste pointe sur un fichier de données d'atténuation ainsi que sur son image associée.

Modèle « Input values »

Ce modèle liste les données d'entrée des calculs lancés par les utilisateurs de la DEUFRABASE. Ce modèle est le cœur du calcul des indicateurs acoustiques. Ce dernier permet également de connaître le taux de fréquentation de la DEUFRABASE. Enfin, des requêtes lancées à partir de ce modèle permettront de mieux connaître les habitudes des utilisateurs du site.

Modèle « Pavements »

Ce modèle liste les différents revêtements de chaussée présentés dans la vue de l'étape de sélection de ces derniers.

Modèle « Traffic »

Ce modèle liste les deux configurations du nombre de voies par direction (une ou deux voies). Ces données sont liées à des images reprises dans la vue de saisie des données trafic.

Modèle « Uploads »

Ce modèle liste les fichiers téléchargés par les utilisateurs.

4.4.5.2. Les scripts Datatools

Afin de ne pas rentrer un à un les enregistrements dans les modèles des géométries et des revêtements de chaussée, des scripts Python ont été développés. Ces outils ont été conservés afin de gérer plus facilement l'ajout, la modification ou la suppression d'un nombre significatif d'enregistrements.

L'administrateur a donc la possibilité d'exécuter les scripts sauvegardés dans le dossier *datatools* de l'application *calculations*. Ces scripts sont au nombre de deux, *ImportGeometries.py* et *ImportPavements.py*.

4.4.6. Perspectives

Les principes Django exposés plus haut offrent des perspectives de développement. Nous soulignons par ailleurs que le LAE en est à son premier développement en Django auquel sont venus se greffer des développements JavaScript (langage non maîtrisé par le LAE). Le code déroulé est donc largement optimisable.

4.4.6.1. Intégration de géométries et de revêtements urbains

Nous avons vu plus haut la flexibilité donnée à l'administrateur du site d'ajouter des listes de géométries ou de revêtements. Une fois les géométries urbaines définies et les calculs d'atténuation réalisés, et une fois les spectres des revêtements urbains mesurés, la DEUFRABASE pourra intégrer une dimension urbaine, en complément de sa dimension péri-urbaine actuelle.

4.4.6.2. Ajout des futurs indicateurs

Cette section suggère les questions suivantes. Quels seront les prochains indicateurs acoustiques du bruit de trafic ? Ces indicateurs s'appuieront-ils sur les mêmes données d'entrée mentionnées plus haut ? Par quelle méthode de calcul, fréquentielle ou temporelle, seront-ils obtenus ?

Dans le cas où le calcul des futurs indicateurs se basent sur les mêmes données d'entrée que celles du LA_{eq} et du L_{den} , il sera aisé de compléter l'application existante *calculations*. En effet, l'essentiel du travail de l'administrateur consistera à intégrer une classe Python de calcul d'indicateurs, et à modifier le gabarit *html* présentant les résultats.

Dans le cas où le calcul de nouveaux indicateurs s'appuie sur de nouvelles données, l'administrateur créera une nouvelle application à l'image de l'application existante *calculations*.

4.4.6.3. Autres perspectives

- La présentation des pages pourrait être améliorée afin d'offrir davantage de confort visuel à l'utilisateur. Un système de feuilles de style en cascade (ou CSS en anglais) pourraient être mis en place.
- L'affichage du LA_{eq} horaire dans le cas de données trafic téléchargés pourrait être mis en ligne (se reporter à la section précédente '*Résultats du LA_{eq} horaire*').

4.4.7. Arborescence de la DEUFRABASE

Le site est sauvegardé sur le serveur *deufrabase.ifsttar.fr*, plus exactement dans le dossier *deufrabase*. L'arborescence du site est composée des sous-dossiers *deufrabase* et *calculations* :

```
deufrabase/  
  manage.py  
  db.sqlite3  
  deufrabase/  
    __init__.py  
    settings.py  
    urls.py  
    wsgi.py  
  calculations/  
    acoustics/  
    datatools/  
    uploadtests/  
      __init__.py  
      admin.py  
      forms.py  
      models.  
      urls.py  
      views.py
```

4.4.8. Modèle MVC appliqué à la DEUFRABASE

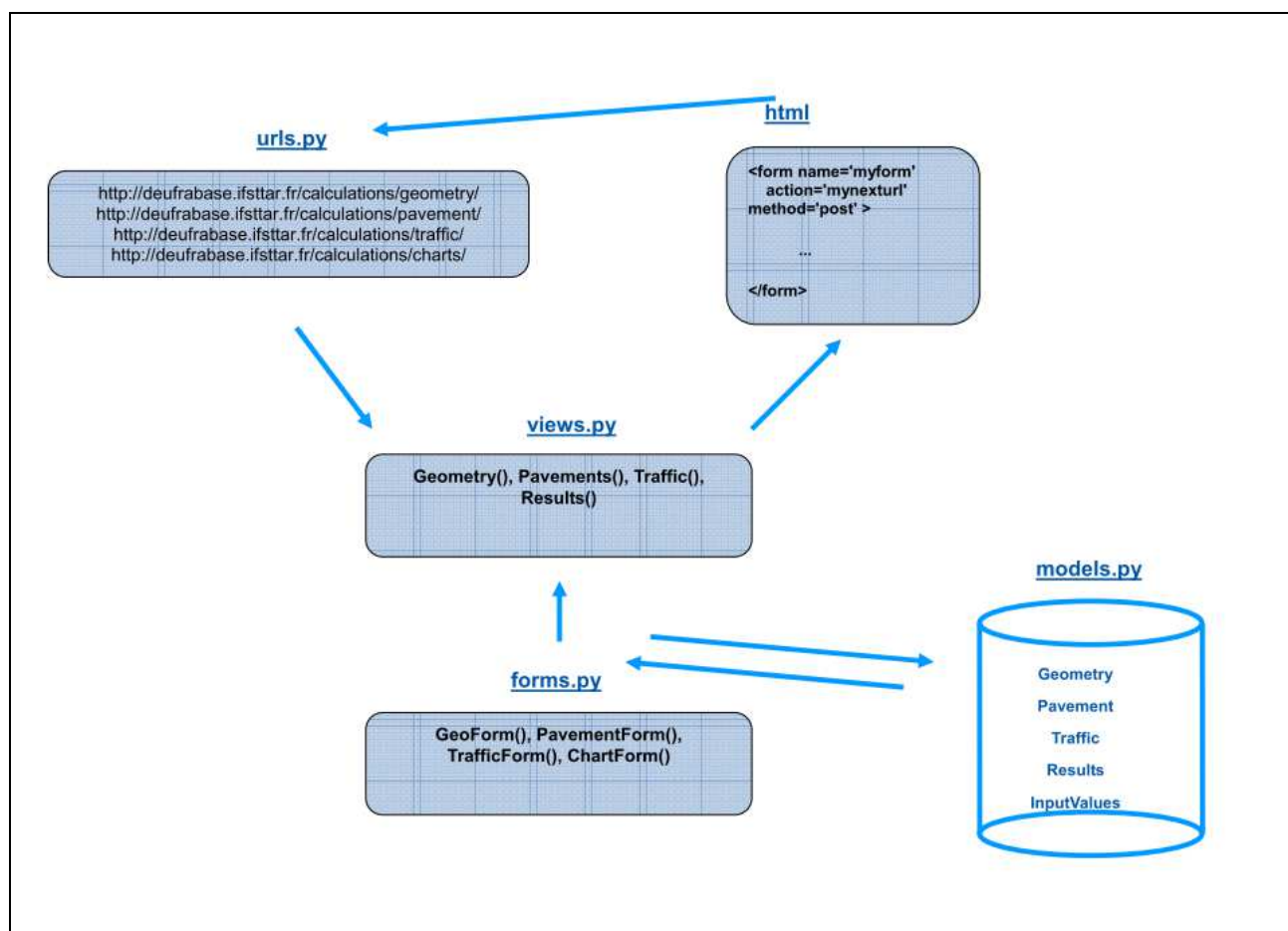


Figure 240 : Modèle MVC appliqué à la DEUFRABASE

5. Tâche n°4 : Valorisation et dissémination des résultats

Au cours de ces quatre années, outre les rapports internes qui ont servi de base à l'élaboration du présent rapport, 11 communications lors de divers congrès ont été rédigées et un article a été soumis dans une revue internationale à comité de lecture.

En complément, diverses présentations ont été faites lors des réunions bilatérales franco-allemande qui se sont tenues alternativement en France et en Allemagne, lors des diverses Journées Techniques Acoustique et Vibrations du réseau technique de l'équipement et enfin lors du séminaire de clôture qui s'est tenu à Bron en décembre 2015.

Le dernier résultat valorisable est la nouvelle version de la base de données DEUFRABASE qui a été restructurée et qui sera prochainement en accès libre à partir d'un site web hébergé par l'Ifsttar.

L'ensemble des communications et présentations est référencé ci-dessous.

5.1. Compte-rendus des réunions plénières

5.1.1. Réunions du consortium français

- [CR1] **ODsurf_Réunion démarrage Ifsttar_CR_Paris_220312_version finale**, *Compte-rendu de la 1^{ère} réunion du consortium français*, 22 mars 2012.
- [CR2] **ODsurf_2^{ème} Réunion Colas_CR_Paris_051112_version 2.0**, *Compte-rendu de la 2^{ème} réunion du consortium français*, 05 novembre 2012.
- [CR3] **ODsurf_3^{ème} Réunion Eurovia_CR_Rueil-Malmaison_050913_version finale**, *Compte-rendu de la 3^{ème} réunion du consortium français*, 05 septembre 2013.
- [CR4] **ODsurf_4^{ème} Réunion Ifsttar_CR_MLV_091014_version finale**, *Compte-rendu de la 4^{ème} réunion du consortium français*, 09 octobre 2014.
- [CR5] **ODsurf_5^{ème} Réunion ENPC_CR_MLV_280915_version finale**, *Compte-rendu de la 5^{ème} réunion du consortium français*, 28 septembre 2015.

5.1.2. Réunions du consortium franco-allemand

- [CR6] **ODsurf_Minutes of the Kick-off meeting_BASt_Bergisch Gladbach_24250113**, *Minutes of kick-off meeting*, January 24-25, 2013.
- [CR7] **ODsurf_Minutes 2nd consortium meeting_FNTP_Paris_21221113**, *Minutes of 2nd consortium meeting*, November 21-22, 2013.
- [CR8] **ODsurf_Minutes 3rd consortium meeting_RTWH_Aachen_16171014**, *Minutes of 3rd consortium meeting*, October 16-17, 2014.

5.2. Rapports divers

- [R1] **J. CESBRON, Y. PICHAUD, B. TIAN, V. GARY**, *Mesures acoustiques sur la piste de référence de l'Ifsttar dans le cadre du projet ODSurf*, Rapport Ifsttar-LAE, Mai 2013.
- [R2] **Ph. KLEIN, F. CONTE**, *DEUFRAKO – ODSurf, Rapport intermédiaire, Contribution Ifsttar/LAE-Bron*, Rapport Ifsttar-LAE, Mai 2013.
- [R3] **B. TIAN, J. CESBRON**, *Partitioning of road surfaces*, Rapport Ifsttar-LAE, Mai 2013
- [R4] **M. BÉRENGIER, J. CESBRON, F. CONTE, Ph. KLEIN, J. LELONG, J. PICAUT, B. TIAN, D. DUHAMEL, H. YIN, E. COQUELLE, J.L. GAUTIER, B. POUTEAU**, *ODSurf : Modélisation et réalisation d'une couche de roulement de chaussée optimisée, dense et peu bruyante*, Rapport à mi-parcours, Projet DEUFRAKO – ODSurf, Convention ADEME N°: 11 17 C0038, mai 2013
- [R5] **S. MOKHTARI**, *Validation expérimentale de la loi de contact pneumatique/chaussée*, Rapport de stage scientifique ENPC, 2014
- [R6] **L. PAHLEVANI, D. DUHAMEL, G. CUMUNEL, H.P. YIN**, *Comparison of different tire models for tire/road noise applications*, rapport de recherche ENPC, 2014
- [R7] **A. BÉGUÈRE**, *ODSurf project study report : P2RN Vs TLM attenuations comparison*, Rapport Ifsttar-LAE, Septembre 2014.
- [R8] **A. BÉGUÈRE**, *Rapport d'étude ODSurf : Deufrabase*, Rapport Ifsttar-LAE, Octobre 2015.
- [R9] **B. WANG**, *Reduction of acoustic fields of horn-like structures by optimization of network resonators*, Rapport de thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, soutenue le 15 décembre 2015.

5.3. Présentations françaises lors des séminaires bilatéraux

5.3.1. Séminaire à Bergish-Gladbach en Allemagne en janvier 2013

- [SF1] **Ph. KLEIN, J.M. CLAIRET**, *3D texture measurement*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.
- [SF2] **J. CESBRON, D. DUHAMEL, H. YIN**, *Modelling of the dynamic tyre-road contact: various approaches*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.
- [SF3] **F. CONTE, Ph. KLEIN**, *Air pumping modelling*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.
- [SF4] **D. DUHAMEL**, *Horn effect modelling*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.
- [SF5] **E. COQUELLE, J.L. GAUTIER, B. POUTEAU**, *Acoustical optimization of conventional road surfaces*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.
- [SF6] **J. PICAUT, M. BÉRENGIER**, *Extension of the DEUFRABASE to urban configurations*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

5.3.2. Séminaire à Paris en novembre 2013

- [SF7] **Ph. KLEIN, J.M. CLAIRET**, *Results of the 3D texture measurements on Ifsttar test track*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF8] **J. CESBRON, B. TIAN, Y. PICHAUD, V. GARY, Ph. L'HERMITE**, *Results of noise measurements on Ifsttar test track*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF9] **B. TIAN, J. CESBRON**, *Multi-asperity approach for tyre-road contact modelling*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF10] **F. CONTE, Ph. KLEIN**, *Air pumping modelling*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF11] **L. PAHLEVANI, D. DUHAMEL, H. YIN, G. CUMUNEL**, *Study of Tyre/Road Dynamic Contact Problem*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF12] **B. WANG**, *Horn effect : modeling and computation*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF13] **B. POUTEAU**, *Conventional road surfaces: future experiments – EUROVIA Contribution*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF14] **E. COQUELLE, J.-L. GAUTIER**, *Acoustical optimization of conventional road surfaces: future experiments – Colas Contribution*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.
- [SF15] **J. PICAUT, M. BÉRENGIER, A. BÉGUÈRE**, *Extension of the DEUFRABASE to urban configurations*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

5.3.3. Séminaire à Aix-la-Chapelle en Allemagne en octobre 2014

- [SF16] **F. CONTE**, *Modelling of air-pumping mechanisms*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.
- [SF17] **B. WANG, D. DUHAMEL, H. YIN**, *Modelling of horn-effect*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.
- [SF18] **A. BÉGUÈRE, J. PICAUT**, *DEUFRABASE situation*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.
- [SF19] **E. COQUELLE, J.-L. GAUTIER**, *Conventional road surfaces: experiments : Presentation of the Mouvaux Site*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SF20] **B. POUTEAU**, *Conventional road surfaces: experiments : Presentation of the Villeneuve-sur-Lot Site*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SF21] **Ph. KLEIN, J. CESBRON**, *Results of texture and noise measurements on ODSurf French test Sites*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

5.4. Présentations allemandes lors des séminaires bilatéraux

5.4.1. Séminaire à Bergish-Gladbach en Allemagne en janvier 2013

[SD1] **M. OESER**, *Quiet innovative topcoat based on synthetics*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD2] **S. REESE, R. KEBRIAEI, J. SCHNEPP**, *LIDAK : material and structural analysis of the new pavement design*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD3] **C. BÜCKERS, B. DREWES, U. STÖCKERT**, *Quiet road traffic 3 – An interdisciplinary approach to reduce the noise emission at the source*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD4] **B. ALTREUTHER**, *Low noise road from precast slabs in UHPC*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD5] **M. SCHMIDT**, *Multi-functional pavement – Construction, technology, ecology and economy*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD6] **C. TIGGES**, *Concrete in the sense of sustainability: motivation, design and realization*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD7] **M. MÄNNEL**, *Low noise concrete paving stones – Project overview*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD8] **M. SCHMIDT**, *Noise reduced concrete paving blocks made of structurally dense no-slump concrete*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

[SD9] **F. DURÁN, D. LOWKE, J. SKARABIS, C. GEHLEN**, *Optimal pore distribution and durability of porous concrete pavers*, ODSurf kick-off meeting, Bergish-Gladbach, Allemagne, Janvier 2013.

5.4.2. Séminaire à Paris en novembre 2013

[SD10] **M. MÄNNEL**, *Low noise concrete paving stones – Project overview and results for impedance modeling*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD11] **T. BRAUN, M. SCHMIDT**, *Low noise paving blocks of structurally dense concrete*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD12] **F. DURAN, D. LOWKE, J. SKARABIS, C. GEHLEN**, *Optimal pore distribution and durability of porous concrete pavers*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD13] **S. STEFFEN**, *Noise abating CPB*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD14] **B. ALTREUTHER**, *Low noise road from precast slabs in UHPC*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD15] **M. SCHMIDT, S. PIOTROWKI**, *UHPC : Material and production*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD16] **A. SCHACHT**, *Quiet innovative topcoat based on synthetics (LIDAK) : Conceptual approach and its implementation in the laboratory and in-situ*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD17] **M. FASSIN, J. SCHNEPP, S. REESE**, *Material and structural modelling : Quiet innovative topcoat based on synthetics (LIDAK)*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD18] **C. KOCHANÉK**, *Material and structural modelling : Textile reinforced low-noise road surfaces*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

[SD19] **R. BOMHARDT, M. VÖRLANDER**, *Acoustical properties of a porous elastic road surface with structured plastic covering*, 2nd consortium meeting, Paris, Novembre 2013.

5.4.3. Séminaire à Aix-la-Chapelle en Allemagne en octobre 2014

[SD20] **A. SCHACHT, F. OTTO**, *Conceptual approach and its implementation in the laboratory and in-situ*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD22] **M. FASSIN**, *Material and structural modelling*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD23] **R. BOMHARDT, C. KOCHANÉK**, *Textile reinforced low-noise road surfaces*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD24] **B. ALTREUTHER**, *Development of noise-reducing road surfaces by using UHPC precast slabs : Acoustic aspects*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD25] **M. SCHMIDT, S. PIOTROWKI**, *Development of noise-reducing road surfaces by using UHPC precast slabs : Material and production aspects*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD26] **C. TIGGES**, *Concrete in the sense of sustainability*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD27] **C. ZIEBS**, *Implementation in a parking lot (BAB 45)*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD28] **M. SCHMIDT, T. BRAUN**, *Low-noise concrete block pavement : Mix design, production technology and environmental efficiency*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD29] **F. DURAN, D. LOWKE**, *Development of low noise porous concrete pavers*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD30] **S. STEFFEN**, *Sound reduced Concrete Block Pavement (CBP) – Market needs, product development and aspects related to the building practice*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

[SD31] **M. MÄNNEL**, *Low noise concrete paving stones – Project overview and results*, 3rd consortium meeting, Aix-la-Chapelle, Octobre 2014.

5.5. Présentations lors du séminaire de clôture de Bron en décembre 2015

[SB1] **M. BÉRENGIER, P.J. GUSIA**, *Modelling and realization of a low-noise Optimal Dense Surface*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB2] **J. CESBRON, Ph. KLEIN**, *Noise and texture database for models – Presentation of the test sites: Nantes test track and Geilenkirchen test track*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB3] **Ph. KLEIN, J.-M. CLAIRET, J. CESBRON**, *Noise and texture database for models – Development of the texture equipment and Texture measurement results*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB4] **J. CESBRON, Ph. KLEIN**, *Noise and texture database for models – Sound absorption and noise measurement results*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB5] **Ph. KLEIN, J. CESBRON**, *Predicting models : Hybrid approach: HyRoNE model*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB6] **J. CESBRON, B. TIAN**, *Multi-asperity approach for tyre/road contact modelling*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

[SB7] **Ph. KLEIN, F. CONTE**, *Predicting models : Modelling of air-pumping mechanisms*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

- [SB8] **B. WANG, D. DUHAMEL**, *Horn effect considering tire treads and road textures*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB9] **A. BÉGUÈRE, D. STOYANOVA, J. PICAUT**, *DEUFRABASE update*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB10] **M. MÄNNEL**, *Lärmarmes Betonsteinpflaster : Acoustic properties*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB11] **A. S. PASCHMANN**, *INNO-PAVE : Bridging the gap between acoustic optimization, mechanical stability and performance characteristics of the LIDAK structure*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB12] **B. ALTREUTHER**, *Low-noise road from UHPC precast slabs : Texture and acoustics*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB13] **Ph. KLEIN, J. CESBRON**, *Noise and texture measurements by IFSTTAR on UHPC precast slabs*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB14] **E. COQUELLE, J.-L. GAUTIER**, *Low-noise Colas Asphalt Pavement Nanosoft : Noise measurement in Mouvaux test site*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB15] **B. POUTEAU**, *EUROVIA contribution to ODSURF project*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.
- [SB16] **J. CESBRON, Ph. KLEIN, J.-M. CLAIRET, V. GARY**, *Texture and noise measurements on the two French sites : comparison and synthesis*, Séminaire de clôture, Bron, Décembre 2015.

5.6. Présentations lors des Journées Techniques Acoustique et Vibrations

5.6.1. JTAV à Blois en mai 2013

- [JT1] **M. BÉRENGIER**, *Projet DEUFRAKO « ODSURF » : Avancement et perspectives*, Journées Techniques Acoustique et Vibrations, Blois, Mai 2013.
- [JT2] **B. POUTEAU**, *Qualité sonore des revêtements routiers*, Journées Techniques Acoustique et Vibrations, Blois, Mai 2013.
- [JT3] **Ph. KLEIN, J. CESBRON, J.-M. CLAIRET, B. TIAN, Y. PICHAUD, V. GARY**, *Mesures de texture et de bruit dans le cadre du projet ODSurf*, Journées Techniques Acoustique et Vibrations, Blois, Mai 2013.
- [JT4] **B. TIAN, J. CESBRON**, *Modèle de contact multi-aspérités : caractéristiques de la chaussée et du pneumatique*, Journées Techniques Acoustique et Vibrations, Blois, Mai 2013.

5.6.2. JTAV à Bordeaux en juin 2014

- [JT5] **M. BÉRENGIER**, *Projet DEUFRAKO « ODSURF » : Avancement et perspectives*, Journées Techniques Acoustique et Vibrations, Bordeaux, Juin 2014.

5.7. Communication lors de congrès avec actes

5.7.1. Congrès internationaux

- [C11] **F. CONTE, Ph. KLEIN**, *3D CFD modelling of air pumping noise from road cavities with constant volume*, Internoise 2013 Congress, Innsbruck, Autriche, Septembre 2013.
- [C12] **B. WANG, D. DUHAMEL**, *Calculation of the three-dimensional sound pressure field around bodies with macro porosities*, ICSV 21, Beijing, China, 13-17 juillet 2014.

- [C13] **M. BÉRENGIER, P.J. GUSIA**, *ODSURF: Optimized low noise urban road surfaces*, Internoise 2014, Melbourne, Australie, novembre 2014.
- [C14] **F. CONTE, P. KLEIN, M. BÉRENGIER**, *Investigating lateral porosity effect on air pumping noise from connected road cavities with CFD simulations*. Internoise 2014, Melbourne, Australie, novembre 2014.
- [C15] **J. CESBRON, Ph. KLEIN, V. GARY, et J.-M. CLAIRET**, *On site acoustic characterization of optimized very thin asphalt concretes*, Eurnoise 2015, Maastricht, The Netherlands, 2015, p. 1303-1308.
- [C16] **Ph. KLEIN, J. CESBRON**, *A 3D envelopment procedure for tyre belt radiated noise level prediction*, Internoise 2016, Hambourg, Allemagne, 21-24 août 2016.
- [C17] **J. CESBRON, M. BÉRENGIER, P.J. GUSIA**, *ODSURF project : Modelling and experimental optimization of low noise pavements*, Internoise 2016, Hambourg, Allemagne, 21-24 août 2016.

5.7.2. Congrès nationaux

- [CN1] **B. WANG, D. DUHAMEL**, *Calcul de l'effet dièdre d'un pneumatique avec des sculptures*, Congrès Français d'Acoustique, Poitiers, 22-25 avril 2014.
- [CN2] **J. CESBRON, Ph. KLEIN**, *Une nouvelle base de données texture/bruit pour la prévision du bruit de contact pneumatique/chaussée*, Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, 11-15 avril 2016.
- [CN3] **M. BÉRENGIER, P.J. GUSIA**, *Revêtements de chaussée peu bruyants pour le milieu urbain : bilan du projet ODSURF*, Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, 11-15 avril 2016.
- [CN4] **D. DUHAMEL, B. WANG**, *Etude de réseaux de résonateurs acoustiques pour la réduction du bruit de contact pneumatique chaussée*, Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, 11-15 avril 2016.

5.8. Articles dans une revue à comité de lecture

- [A1] **B. WANG, D. DUHAMEL**, *On the design and optimization of acoustic network resonators for tire/road noise reduction*, soumis à la revue Applied Acoustics.

6. Bilan / Principaux résultats obtenus

Au cours de ce projet, nous avons travaillé en parallèle sur plusieurs points :

- Une meilleure connaissance des phénomènes physiques au travers de la modélisation ;
- La réalisation de surfaces de chaussées innovantes ;
- La réalisation d'expérimentations sur sites test ;
- La réalisation d'expérimentations in situ après mise en place des revêtements optimisés sur l'aspect sonore ;
- Validation des modèles de prévision de bruit par une approche hybride (modèle HyRoNe) ;
- Mise à jour de la base de données DEUFABASE aux nouveaux standards informatiques.

Concernant la modélisation, même si des avancées substantielles sont à mettre au crédit de ce projet :

- Modélisation de l'air pumping à partir de la théorie de la mécanique des fluides ;
- Modélisation de l'effet dièdre en prenant en compte les dessins du pneumatique ainsi que la texture de chaussée ;
- Modélisation des phénomènes de contact par une approche multi-asphérités ;

du travail reste encore à faire pour mettre bout à bout l'ensemble de ces modèles et ainsi pouvoir avoir « *un modèle physique de référence* » qui pourra servir dans une autre étape à valider des modèles simplifiés qui pourront être mis à disposition des professionnels de la route afin de pouvoir optimiser a priori leurs nouvelles formulations.

Concernant la réalisation des surfaces de chaussée innovantes, un pas important a été franchi par rapport au précédent projet P2RN. Les partenaires allemands ont pu concevoir et réaliser dans le cadre de l'appel d'offre lancé par la BAST, de nouveaux types de revêtement à base de béton de ciment dense (UHPC) ou

poreux (pavés) ainsi que de matériaux synthétiques (LIDAK). A part le procédé LIDAK qui demande à être testé plus amplement, notamment en termes de durabilité, les deux autres ont pu être mis en place dans des conditions réelles et ont produit des atténuations sonores intéressantes (de 2 à 7 dBA en fonction des formules et de la vitesse) par rapport au référentiel allemand. Si on les compare dans les mêmes conditions d'usage au référentiel français (BBSG 0/10), les atténuations sont plus faibles mais n'en demeurent pas moins potentiellement intéressantes dans des situations où des revêtements à faible bruit de type BBTM à faible granularité comme ceux testés au cours de ce projet ne peuvent pas être mis en place. Il ressort néanmoins, que les revêtements de type BBTM de granularité 0/4 ou 0/6 sont actuellement les revêtements les moins bruyants sur le marché. Concernant les revêtements allemands, bien qu'ils présentent l'avantage d'être mieux adaptés aux réparations de chaussées, particulièrement en milieu urbain, du fait de leur nouveauté et de leur conception industrielle sous forme d'éléments, ils demandent encore à être améliorés. Ceci concerne notamment les techniques de mise en œuvre pour s'affranchir des problèmes liés aux joints entre plaques générateurs de bruit. Cette nouvelle étape franchie, des résultats encore meilleurs pourraient être obtenus et ainsi devenir complémentaires des revêtements plus conventionnels à faible bruit tels que ceux développés en France par les entreprises partenaires du projet.

Concernant l'aspect expérimental, ce projet aura permis de concevoir un analyseur de texture 3D permettant de mesurer la géométrie de surface sur de plus grandes dimensions et surtout sur une longueur représentative de plusieurs tours de roue. Cet outil est indispensable pour obtenir précisément les caractéristiques physiques d'une chaussée indispensables à l'alimentation des modèles physiques et des modèles hybrides. Par ailleurs, les diverses techniques de mesure bien maîtrisées par les différentes équipes ont permis de mesurer à la fois le bruit de roulement en champ proche (CPX) ou au passage d'un véhicule (CB) ainsi que l'absorption des couches de roulement présentant une certaine porosité et ainsi pouvoir comparer les résultats obtenus par les équipes françaises et allemande sur deux sites allemands (pistes de référence à Geilenkirchen pour une validation future des modèles théoriques de prévision du bruit de roulement et sur le site autoroutier de Meinerzhagen).

Enfin, concernant la base de données DEUFRABASE, une nouvelle version a été réalisée avec des outils informatiques actuels qui permettront des mises à jour ainsi que des ajouts de configurations géométriques, de nouveaux revêtements ainsi que de nouveaux types de trafic plus aisément. Cette nouvelle version sera accessible gratuitement sur un site hébergé par l'IFSTTAR.

7. Conclusions / Perspectives

Faisant suite au projet P2RN qui avait permis de démarrer une collaboration franco-allemande dans le cadre plus large du DEUFRAKO, ce projet a permis d'aborder au cours des quatre années l'ensemble de la problématique liée à la conception, à la réalisation et à la validation des couches de revêtement de chaussées peu bruyantes à usage urbain.

Au cours des années 1990-2000, un effort important avait été réalisé par les entreprises routières pour concevoir des couches de roulement peu bruyantes poreuses qui alliaient des capacités de drainabilité à des capacités d'absorption des ondes sonores produites par les véhicules lors de leurs déplacements. Des problèmes liés à la pérennité des performances acoustiques des revêtements drainants avaient conduits les entreprises à travailler à la réalisation de revêtements en couches minces (BBTM). Les recherches dans le domaine ayant montré que la dimension des granulats avait un fort impact sur l'émission sonore liée à la mise en vibration de la carcasse des pneumatiques, la profession s'est tout naturellement dirigée vers des formulations intégrant des granulats de petite dimension (0/6 mm, voire même 0/4 mm). Deux de ces formulations ont d'ailleurs été testées avantageusement au cours de ce projet et l'une d'entre elle a même montré que 5 ans après sa mise en service en milieu périurbain, elle présentait encore des caractéristiques intéressantes en termes de diminution du bruit de roulement.

Ces formulations présentant une certaine porosité, elles ont malgré tout tendance à perdre de leur efficacité avec le temps, même si cela se produit moins rapidement qu'avec les revêtements drainants. L'idée a donc germé de produire des couches de roulement denses à faible bruit en agissant sur la texture de surface. Une première étape a donc été conduite lors du précédent projet P2RN sur la base des résultats obtenus lors d'un projet européen ITARI au sein duquel un des partenaires allemands avait participé. Une forme de texture a donc été conçue à partir d'une approche théorique utilisant une approche hybride (logiciel SPERoN). Cette texture a été mise en place avec une technique qui n'avait pas permis d'obtenir le résultat escompté. De nouvelles techniques ont donc été étudiées par les partenaires allemands dans le cadre du présent projet. Beaucoup plus utilisées en Allemagne, des techniques à base de béton de ciment ont été expérimentées et testées. Même si des améliorations au niveau de la mise en œuvre sont encore

envisageables, des premiers résultats encourageants ont été enregistrés. Ceci permettra d'avoir, selon les conditions d'usage, une plus large palette de solutions pour rendre nos routes et nos rues plus agréables du point de vue de la nuisance sonore.

Enfin, ce projet a montré qu'à partir d'une modélisation théorique, même si les modèles ne sont pas optimaux, il était possible de concevoir de nouvelles couches de roulement peu bruyantes. Il nous semble donc indispensable de poursuivre les études sur la connaissance des phénomènes de génération de bruit de roulement, part importante du bruit du trafic routier, afin de mieux maîtriser tous ces phénomènes et ainsi, de concevoir des outils numériques regroupant l'ensemble des phénomènes générateurs de bruit (vibrations du pneumatique, pompage d'air, effet dièdre et absorption), validés par des techniques expérimentales les mieux adaptées, qui nous permettront de mieux optimiser nos chaussées afin de réduire encore le bruit produit par les véhicules circulant sur ces revêtements tout en conservant d'excellentes caractéristiques d'adhérence indispensables pour assurer la sécurité des usagers de la route.

Références bibliographiques

Classer les références par ordre alphabétique des noms d'auteur ou par ordre d'apparition dans le texte. Il est vivement conseillé de les numérotter, avec renvoi depuis le texte vers la bibliographie

- [1] DEUFRAKO-P2RN : Prediction and Propagation of Rolling Noise, Rapport final, Mars 2009.
- [2] B. ALTREUTHER, F&E « Lärmarme Fahrbahn aus UHPC-Fertigteilen » - Schlussbericht, Novembre 2014 (*en allemand*).
- [3] Projet LeiStra1 : Low noise road traffic project 1 ; German federal Highway research Institute (BAST), 2001-2004. Final report: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Straßenbau, Heft 37, 2004.
- [4] Projet ITARI: Integrated Tyre and Road Interaction, 6ème PCRD, http://cordis.europa.eu/result/rcn/47903_en.html
- [5] SPERON : www.speron.net
- [6] M. MÄNNEL, F&E « Lärmarmes Betonsteinpflaster » - Schlussbericht, Novembre 2014 (*en allemand*).
- [7] RTWH Aachen University, F&E « Leise innovative Deckschicht auf Kunststoffbasis – LIDAK » – Abschlussbericht, Novembre 2014 (*en allemand*).
- [8] Projet PERSUADE : **PoroElastic Road Surface**: an innovation to **Avoid Damages** to the **Environment**, 7ème PCRD, Rapport final.
- [9] ISO/DIS 11819-2, Acoustique – Méthode de mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation – Partie 2 : Méthode de proximité immédiate, 2015.
- [10] NF EN ISO 11819-1. Acoustics – measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – part 1: Statistical pass-by method, March 2002.
- [11] GNCDS / IDRRIM. Note d'information CFTR n°20 – Performances acoustiques in situ des revêtements de chaussées – Méthode expérimentale de caractérisation, de vérification et de suivi. 2010.
- [12] Méthode d'essai des lpc n°63, Mesure en continu du bruit de contact pneumatique/chaussée, édition Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2008.
- [13] Norme XP S 31-145-1, Acoustique – Caractérisation in situ des performances acoustiques des revêtements de chaussées – Mesure du bruit de contact pneumatique / chaussée en continu – Partie 1 : Mesure d'expertise, 2007
- [14] Norme ISO 13473-1, Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface – Partie 1 : Détermination de la profondeur moyenne du profil, 1997
- [15] ISO 13472-1, Acoustique – Mesurage in situ des propriétés d'absorption acoustique des revêtements de chaussées – Partie 1 : Méthode de la surface étendue, Juin 2002.
- [16] M. C. BERENGIER, M. R. STINSON, G. A. DAIGLE et J-F. HAMET, Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects, JASA, vol 101, no 1, p. 155-162, 1997.
- [17] U. SANDBERG et J. A. EJSMONT, Tyre/road noise reference book. Informex, 2002.
- [18] F. ANFOSSO-LÉDÉE. The development of a new tire-road noise measurement device in France, proceedings of the 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Toronto, Canada, 2004.
- [19] F. ANFOSSO-LÉDÉE et J. KRAGH. Wind noise influence on close-proximity tire/road noise measurements with uncovered systems, proceedings of Internoise 2013, Innsbruck, Austria, 2013.
- [20] Directive 2001/43/EC of the European parliament and of the council of 27 June 2001 amending council directive 92/23/EEC relating to tyres for motor vehicles and their trailers and to their fitting, August 2001.
- [21] G. DUTILLEUX, L. TOUSSAINT, R. WINTZER, J. MEYBLUM et J. BAUCHE. dB Euler 2.0 : Outils pour la mesure de bruit de roulement au passage, LRPC de Strasbourg, 2013.
- [22] Norme NF EN 61672-1. Electroacoustics – sound level meters – part 1: Specifications, March 2014.
- [23] G. SAPORTA. Probabilités, analyse des données et statistique. Paris, TECHNIP, 2006.

- [24] J. WINROTH, C. HOEVER, W. KROPP and T. BECKENBAUER. The contribution of air-pumping to tyre/road noise. In Proceedings of AIA-DAGA 2013, Merano, Italy, 2013.
- [25] U. SANDBERG. The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. In Proceedings of Euronoise 2003, Naples, Italy, 2003.
- [26] T. BECKENBAUER, P. KLEIN, J.F. HAMET, W. KROPP, Tyre/road noise prediction : A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 1, Acoustics'08, Paris, France (2008)
- [27] P. KLEIN, T. BECKENBAUER, J.F. HAMET, W. KROPP, Tyre/road noise prediction : A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 2, Acoustics'08, Paris, France (2008)
- [28] P. KLEIN, J.F. HAMET, F. ANFOSSO-LEDEE, An envelopment procedure for tire/road contact, Surf 2004, Toronto, 2004.
- [29] J.J. KALKER, Two algorithms for the contact problem in elastostatics. Technical report, Delft University of Technology, 1982.
- [30] U. SANDBERG, Tyre/road noise : myths and realities, proceedings of Internoise 2001, The Hague, The Netherlands, 2001.
- [31] U. SANDBERG et G. DESCORNET, Road surface influence on tire/road noise, proceedings of Internoise 1980, Miami, Florida, pp. 1-16, 1980.
- [32] G. DUBOIS, Modèle de contact dynamique pneumatique/chaussée par approche multi-aspérités : application au bruit de roulement, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 2012.
- [33] J. CESBRON, Influence de la texture de chaussée sur le bruit de contact pneumatique/chaussée, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes - Université de Nantes, 2007.
- [34] K. L. JOHNSON, Contact mechanics. Cambridge University Press, 1985.
- [35] G. DUBOIS, J. CESBRON, H. P. YIN et F. ANFOSSO-LÉDÉE, Numerical evaluation of tyre/road contact pressures using a multi-asperity approach, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 54, n° 1, pp. 84-94, 2012.
- [36] G. DUBOIS, J. CESBRON, H. P. YIN, F. ANFOSSO-LÉDÉE et D. DUHAMEL, Statistical estimation of low frequency tyre/road noise from numerical contact forces, Applied Acoustics, vol. 74, n° 9, pp. 1085-1093, 2013.
- [37] L. VINCENT et P. SOILLE, Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 13, n° 6, pp. 583-598, 1991.
- [38] S.K. CLARK, The rolling tire under load. SAE Paper (1965) 650493.
- [39] J.T. TIELKING, Plane vibration characteristics of a pneumatic tire model. SAE Paper (1965) 650492.
- [40] F. BOHM, Mechanik des gurtelreifens. Ingenieur-Archiv 35, 82-101, 1966.
- [41] H.B. PACEJKA, Tire in-plane dynamics in: S.K. Clark, Mech. Pneu. Tires 122, National Bureau of standards Monograph, Washington, DC, 1971.
- [42] J. PADOVAN, On viscoelasticity and standing wave in tires. Tire Sci. Tech. 4 (1976) 233-246.
- [43] G.R. POTTS, C.A. BELL, L.T. CHAREK et T.K. ROY, Tire vibrations. Tire Sci. Tech. (1977) 202-225.
- [44] L.E. KUNG, Radial vibration of pneumatic radial tires. General Tire Inc, 1987.
- [45] S.C. HUANG et W. SOEDEL, Response of rotating rings to harmonic and periodic loading and comparison with the inverted problem. J. sound vibr. 118 (1987) 253-270.
- [46] S.C. HUANG, The vibration of rolling tires in ground contact. J. vehicle design 13 (1992) 78-95.
- [47] Y.T. WEI, L. NASDALA et H. ROTHERT, Analysis of forced transient response for rotating tires using REF models. J. Sound Vibr. 320 (2008) 145-162.
- [47] R.J. PINNINGTON, A.R. BRISCOE, A wave model for a pneumatic tire belt. J. Sound Vibr. 253 (2002) 969-987.
- [49] T.D. VU, D. DUHAMEL, Z. ABBADI, H.P. YIN, A. GAUDIN, Dynamic analysis of a tire using a nonlinear Timoshenko ring model. ISMA2012-USD2012, Leuven 2012.
- [50] W. KROPP, Structure borne sound on smooth tire. Appl. Acoustics 26 (1989) 181-192.
- [51] J.F. HAMET, Tire/road noise: time domain Green's function for the orthotropic plate model. Acustica 87 (2001) 470-474.
- [52] K. LARSSON et W. KROPP, A high-frequency three-dimensional tire model based on two coupled elastic layers. J. Sound Vibr. 253 (2002) 889-908.

- [53] J. PÉRISSE, J.M. CLAIRET et J.F. HAMET, Modal testing of a smooth tire in low and medium frequency-estimation of structural parameters. IMAC XVIII (2000) 960-967.
- [54] L. BRILLOUIN, Wave propagation in periodic structures, second edition, Dover, New York, 1953.
- [55] D.J. MEAD, Wave propagation in continuous periodic structures: research contributions from Southampton, J. Sound Vibr. 190 (1996) 495-524.
- [56] L. HOUILLON, M.N. ICHCHOUH et L. JEZEQUEL, Wave motion in thin-walled structures, J. Sound Vibr. 281 (2005) 483-507.
- [57] B.R. MACE, D. DUHAMEL, M.J. BRENNAN et L. HINKE, Finite element prediction of wave motion in structural waveguides, J. Acous. Soc. Ame. 117 (2005) 2835-2843.
- [58] D. DUHAMEL, B.R. MACE et M.J. BRENNAN, Finite element analysis of the vibrations of waveguides and periodic structures. J. Sound Vibr. 294 (2006) 205-220.
- [59] Y. WAKI, B.R. MACE et M.J. BRENNAN, Free and forced vibrations of a tire using a wave/finite element approach. J. Sound Vibr. 323 (2009) 737-756.
- [60] D.J. EWINS, Modal testing: theory and practice, Research studied press LTD, 1986.
- [61] P. ANDERSSON, K. LARSSON et W. KROPP, A method for experimental collection of global material data for tires, Nordic Vibration Research, 2001.
- [62] H. NGUYEN, Une nouvelle approche pour structures périodiques ; Application au calcul des vibrations d'un pneumatique. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2008.
- [63] P. BELLYNCK, Contact pneumatique-chaussée – Résolution numérique du problème de contact normal pour un indenteur à symétrie de révolution en vue de son extension au contact du pneumatique sur la chaussée, Rapport Inrets MMA 9401, 1994.
- [64] D. RONNEBERGER, Experimentelle und theoretische untersuchungen spezieller mechanisemen der rollgeräuschenstehung und abstrahlung – Reifengeräuch und strassenbau, In: Internationales Seminar Zurich (Suisse), 9-10 février 1984.
- [65] F. CONTE, Modélisation CFD du phénomène acoustique de pompage d'air dans un contact pneumatique/chaussée, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2008, 270 p.
- [66] J.-F. HAMET, C. DEFFAYET et M.-A. PALLAS, Phénomènes d'air-pumping dans le bruit de contact pneumatique/chaussée – Cas d'une cavité aménagée dans la chaussée, Rapport INRETS n°132, 1990, 78 p.
- [67] J. EISENBLAETTER, Experimental investigation of air related tyre/road noise mechanisms, Doctoral thesis, Loughborough University, United Kingdom, 2008, 240 p.
- [68] F. CONTE, Ph. KLEIN, 3D CFD modelling of air pumping noise from road cavities with constant volume, Internoise 2013, Innsbruck, Autriche, Septembre 2007.
- [69] D. RONNEBERGER, K. SCHAAF et K. RICHTER, Messung der strömungs- und druckverteilung im bereich der aufstandsfläche rollender reifen, Rapport technique. Göttingen (Allemagne): Drittes Physikalisches Institut, Université de Göttingen, 1982, 53 p.
- [70] F. CONTE, Ph. KLEIN, M. BERENGIER, Investigating lateral porosity effect on air pumping noise from connected road cavities with CFD simulations, Internoise 2014, Melbourne, Australie, Novembre 2014.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : *Revêtement français ; **Revêtement allemand ; °Vitesse de référence française °°Vitesse de référence allemande	p 12
Tableau 2 : Résultats des mesures au passage d'un véhicule	p 16
Tableau 3 : Résultats des mesures CPX à la vitesse de 50 km/h	p 17
Tableau 4 : Critères employés dans l'élaboration des formules du chantier de la RD 911	p 25
Tableau 5 : Composition du VIAPHONE® du chantier de la RD 911	p 26
Tableau 6 : Composition du VIAPHONE® X1 du chantier de la RD 911	p 26
Tableau 7 : Composition du VIAPHONE® X2 du chantier de la RD 911	p 26
Tableau 8 : Relevé des épaisseurs moyennes des différences planches de VIAPHONE®	p 27
Tableau 9 : Description des profils de texture	p 37
Tableau 10 : Longueur d'onde et fréquences spatiales centrales des tiers d'octave pour l'évaluation des spectres de texture (les longueurs d'onde et fréquences centrales des bandes d'octave sont donnée en gras)	p 49
Tableau 11 : Nombre de relevés unitaires mesurés pour chaque planche et taille du relevé reconstruit	p 50
Tableau 12 : Profondeurs moyennes de profils (PMP) évaluées sur les trois planches testées	p 51
Tableau 13 : Valeurs des moments statistiques Rq, Rsk et Rku évaluées sur les trois planches testées	p 51
Tableau 14 : Paramètres du modèle d'absorption [R22] recalés à partir des courbes expérimentales	p 56
Tableau 15 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/4 dans le cas du pneumatique à motifs	p 61
Tableau 16 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/6 dans le cas du pneumatique à motifs	p 63
Tableau 17 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche BBTM 0/6 dans le cas du pneumatique lisse	p 65
Tableau 18 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche UHPC dans le cas du pneumatique à motifs	p 66
Tableau 19 : Niveaux de bruit globaux à différentes vitesses pour la planche UHPC dans le cas du pneumatique lisse	p 67
Tableau 20 : Comparaison des niveaux de bruit à 70 km/h pour le pneumatique à motifs	p 68
Tableau 21 : Comparaison des niveaux de bruit à 70 km/h pour le pneumatique lisse	p 70
Tableau 22 : Description des 11 surfaces de chaussée testées sur la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (France)	p 73
Tableau 23 : Description des 6 surfaces de chaussée testées sur la piste de la BAST à Geilenkirchen (Allemagne)	p 75
Tableau 24 : Nombre de relevés de texture unitaires mesurés et taille (largeur et longueur) de la surface reconstruite	p 76
Tableau 25 : PMP, écart-types associés et moments statistiques évalués sur l'ensemble des planches	p 79
Tableau 26 : Paramètres du modèle d'absorption [16] recalés à partir des courbes Expérimentales	p 82
Tableau 27 : Niveaux de bruit global CPX et CB à 90 km/h pour le pneumatique à motifs	p 84
Tableau 28 : Niveaux de bruit global CPX et CB à 90 km/h pour le pneumatique lisse	p 90
Table 29 : Ten road surfaces studied in the present work	p 119
Table 30 : Numerical parameters of the 3D texture measurements during the P2RN project	p 119
Table 31 : Spatial parameters of the 3D texture used for partitioning	p 121
Table 32 : The mechanical and structural properties of the homogeneous tyre	p 134
Table 33 : The mechanical and structural properties of the non-homogeneous tyre [62]	p 137
Table 34 : Predicted and measured results	p 164
Table 35 : Four resonant frequencies for the three optimized networks	p 172
Table 16 : SPL reductions at the resonant frequencies of the three optimized networks	p 174
Table 37 : The number of resonant frequencies of networks with different number of columns and rows	p 175
Table 38 : The resonant frequencies of networks with 2 columns and 3-5 rows	p 175

Figures

Figure 1 : Texte de l'appel d'offre	p 14
Figure 2 : (a) : Texture théorique ; (b) : Réalisation de la plaque d'essai	p 15
Figure 3 : Réalisation de la planche d'essai sur l'autoroute A45	p 15
Figure 4 : Schéma de la remorque anéchoïque de la société Müller-BBM. Chacun des deux pneumatiques sont respectivement représentatifs d'un pneumatique de véhicule léger et d'un pneumatique de véhicule lourd en termes de bruit produit	p 16
Figure 5 : Solution avec des pavés texturés (a) ; Solution avec des pavés en béton de ciment poreux (b)	p 18
Figure 6 : Couche de matériau synthétique (en blanc) sur la couche poreuse (en noir)	p 19
Figure 7 : Matériau positionné sur le banc de mesure de la BAST	p 19
Figure 8 : Matériau mis en place sur site avec la remorque de mesure	p 20
Figure 9 : Echantillons de revêtements : (a) : BBSG ; (b) : BBTM ; (c) : Colgrip ; (d) : Enduit Superficiel ESU ; © : Nanosoft	p 22
Figure 10 : Revêtement Nanosoft à Mouvaux	p 23
Figure 11 : Département du Lot-et-Garonne et commune de Villeneuve-sur-Lot	p 24
Figure 12 : Implantation du chantier expérimental sur la RD 911 (Données cartographiques ©2015 Google)	p 24
Figure 13 : Implantation des trois planches expérimentales sur la section 1 de la RD 911	p 25
Figure 14 : Centrale d'enrobage LGE de Marmande – Additif X1 conditionné en sacs sur palettes (gauche) et incorporation de l'additif par la trappe d'introduction du malaxeur avant l'injection du bitume (droite).	p 27
Figure 15 : Mise en œuvre des procédés VIAPHONE® sur le chantier de la RD 911	p 27
Figure 16 : Dispositifs de mesure des épaisseurs par imagerie RADAR	p 28
Figure 17 : Vue d'ensemble sur véhicule de mesure du bruit en champ proche EUROVIA	p 29
Figure 18 : Sculpture du pneumatique de mesure (gauche) et supports de microphone (droite)	p 30
Figure 19 : Vue d'ensemble du Stéréophotomètre et du système photo	p 31
Figure 20 : Capture d'écran du logiciel de traitement des données et d'un profil 2D isolé	p 31
Figure 21 : Dispositif de mesure de texture sur le site de la RD 911 (Villeneuve-sur-Lot)	p 33
Figure 22 : Désordres observé sur la planche expérimentale X1	p 33
Figure 23 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® à 70 km/h	p 34
Figure 24 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® à 90 km/h	p 34
Figure 25 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 70 km/h	p 35
Figure 26 : Niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 90 km/h	p 35
Figure 27 : Position du point de référence pour les essais acoustique et de texture sur le graphe du niveau sonore CPX pour la planche expérimentale de VIAPHONE® X2 à 90 km/h	p 36
Figure 28 : Programme d'essais sur la RD 911	p 36
Figure 29 : Essai de texture sur le point de référence de la RD 911 (1- dispositif d'essai EUROVIA, 2- dispositif d'essai IFSTTAR)	p 37
Figure 30 : Implantation des profils de mesure sur le point de référence de la RD 911	p 37
Figure 31 : Implantation des trois profils de mesure de texture sur le RD 911	p 38
Figure 32 : Chevauchements des photos pour les profils de texture : a) à gauche, b) à droite	p 38
Figure 33 : Orientation des profils de texture	p 39
Figure 34 : Courbes de PMP pour les trois profils (I, II et III).	p 39
Figure 35 : Localisation des trois sites d'essais testés par l'Ifsttar au cours du projet ODSurf.	p 40
Figure 36 : Localisation du site de Mouvaux (gauche), site d'essai avec indication de la voie et du sens de mesure par une flèche noire (en haut à droite) et aperçu de la surface du BBTM 0/4 dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite)	p 41
Figure 37 : Configurations d'essais sur le site de Mouvaux	p 42
Figure 38 : Localisation du site de Villeneuve-sur-Lot (gauche), site d'essai avec indication de la voie et du sens de mesure par une flèche noire (en haut à droite) et aperçu de la surface du BBTM0/6 dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite).	p 42
Figure 39 : Configurations d'essais sur le site de Villeneuve-sur-Lot	p 43
Figure 40 : Localisation du site de Meinerzhagen (gauche), site d'essai (en haut à droite) et aperçu de la surface de l'UHPC dans un cadre de 10 cm par 20 cm (en bas à droite)	p 44
Figure 41 : Configuration d'essai sur le site de Meinerzhagen	p 44

Figure 42 : Schéma-type du capteur laser et principe de balayages successifs de la surface à mesurer pour 5 positions latérales différentes	p 45
Figure 43 : Exemple de profil délivré par le capteur (nuage de points)	p 46
Figure 44 : Différentes vues du système – En haut : vue d'ensemble – En bas à gauche : table de positionnement transversal et mollette de positionnement latéral du capteur – En bas à droite : capteur laser	p 46
Figure 45 : Sélection de six aspérités pour le recalage de deux relevés unitaires adjacents	p 47
Figure 46 : Définition des termes pour le calcul de la profondeur moyenne de profil PMP	p 48
Figure 47 : Extraits des relevés mesurés sur les BBTM 0/4 (à gauche) et BBTM 0/6(à droite) – Extraits de 10cmx 20cm	p 50
Figure 48 : Relevé complet (a) mesuré sur la planche UHPC et détails permettant d'apprécier les imperfections de la réalisation sur site – (b) : détail du réseau de rainures (5cmx5cm), © : rainure de 5mm entre la dalle mesurée et la précédente, (d) : détail des imperfections entre jonctions des éléments constitutifs de la dalle (30cmx80cm), © : marche de 5mm de hauteur à la jonction entre la dalle mesurée et la suivante	p 50
Figure 49 : Valeurs de PMP obtenues sur les trois planches d'essai ainsi que celles obtenues sur les planches E2 et M2	p 51
Figure 50 : Densités de probabilités évaluées sur les BBTM 0/4, BBTM 0/6 et UHPC ainsi que celles évaluées sur les planches E2 et M2	p 52
Figure 51 : Spectres de texture par bande de tiers d'octave évalués sur les BBTM 0/4, BBTM 0/6 et UHPC ainsi que ceux évalués sur les planches E2 et M2	p 52
Figure 52 : Système de mesure d'absorption acoustique	p 53
Figure 53 : Points de mesure d'absorption acoustique autour du Point de Référence (PR) correspondant à la position du microphone utilisé pour la mesure de bruit au passage	p 54
Figure 54 : Coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave mesuré sur le BBTM0/4 et le BBTM0/6	p 55
Figure 55 : Coefficient d'absorption en bande fine mesuré sur le BBTM0/4 et le BBTM0/6 et recalé sur le modèle prédictif [16]. La référence correspond au BBTM0/6 de la piste de l'Ifsttar (planche M2)	p 55
Figure 56 : Véhicule d'essai Renault Scénic utilisé pour les mesures de bruit de contact pneumatique/chaussée (à gauche) et les deux types de pneumatiques testés (standard ou lisse, à droite)	p 56
Figure 57 : Procédure de mesure du bruit de contact pneumatique/chaussée, simultanément au passage et en continu	p 57
Figure 58 : Exemple de mesure CPX et CB simultanée sur la planche d'essai en UHPC de Meinerzhagen	p 58
Figure 59 : Système de mesure CPX	p 58
Figure 60 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/4	p 61
Figure 61 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/4	p 62
Figure 62 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/6	p 63
Figure 63 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur le BBTM 0/6	p 64
Figure 64 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu (gauche) et niveaux de bruit mesurés au passage (droite) en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique lisse roulant sur le BBTM 0/6	p 64
Figure 65 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu (haut) et la mesure au passage (bas) dans le cas du pneumatique lisse roulant sur le BBTM 0/6	p 65
Figure 66 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur l'UHPC	p 66

Figure 67 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique à motifs roulant sur l'UHPC	p 67
Figure 68 : Niveaux de bruit recomposés mesurés en continu en fonction du logarithme en base 10 de la vitesse du véhicule dans le cas du pneumatique lisse roulant sur l'UHPC	p 67
Figure 69 : Spectres de bruit à différentes vitesses obtenus après régression pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique lisse roulant sur l'UHPC	p 68
Figure 70 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique à motifs	p 69
Figure 71 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure au passage dans le cas du pneumatique à motifs	p 69
Figure 72 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure en continu dans le cas du pneumatique lisse	p 70
Figure 73 : Comparaison des spectres de bruit à 70 km/h pour la mesure au passage dans le cas du pneumatique lisse	p 71
Figure 74 : Vue aérienne de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (à gauche) et ses différentes planches d'essais (à droite). Les revêtements testés apparaissent en caractères gras, le sens de mesure et la trace de roulement sont indiqués par une flèche	p 72
Figure 75 : Pistes d'essais de la BAST localisées sur la base aérienne de l'OTAN de Geilenkirchen en Allemagne	p 74
Figure 76 : Planches d'essais testées à Geilenkirchen dans la zone ayant servi à la calibration du modèle allemand SPERoN (en haut) et dans la zone avec des revêtements optimisés pour la réduction du bruit (en bas)	p 74
Figure 77 : Extraits des textures mesurées sur les planches de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais (10 cm x 20 cm) – L'échelle des niveaux de gris est donnée à droite de chaque extrait en mm	p 77
Figure 78 : Extraits des textures mesurées sur les planches du site de Geilenkirchen (10 cm x 20 cm) – L'échelle des niveaux de gris est donnée à droite de chaque extrait en mm	p 78
Figure 79 : Valeurs de PMP des planches à texture aléatoire classées par ordre croissant	p 79
Figure 80 : Densité de probabilités des planches à texture aléatoire	p 80
Figure 81 : Spectres de texture par bandes de tiers d'octave des planches à texture aléatoire	p 80
Figure 82 : Coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave mesuré sur les planches A (BBDr 0/6), LOA, M2 (BBTM 0/6), PMA et PMAG	p 81
Figure 83 : Coefficient d'absorption en bande fine mesuré sur les planches A (BBDr 0/6) et M2 (BBTM0/6) et recalé sur le modèle prédictif [16]	p 82
Figure 84 : Exemples de mesures CPX et CB simultanées sur la planche M2 (à gauche) de la piste de référence de l'Ifsttar à Bouguenais et sur la planche LS1 (à droite) de la piste d'essais de la BAST à Geilenkirchen	p 83
Figure 85 : Classification acoustique des différentes surfaces à la vitesse de référence de 90 km/h à partir des mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs	p 85
Figure 86 : Représentation par ordre croissant de la pente de régression des différentes surfaces obtenue pour les mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs	p 85
Figure 87 : Corrélation entre niveaux de bruit mesurés au passage et en continu (à gauche) et entre les pentes mesurées au passage et en continu (à droite). Statistique incluant les 17 revêtements testés avec le pneumatique à motifs	p 86
Figure 88 : Représentation qualitative des niveaux de bruit en tiers d'octave mesurés au passage à 90 km/h pour l'ensemble des surfaces testées dans le cas du pneumatique à motifs	p 86
Figure 89 : Comparaison des spectres de bruit mesurés en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h	p 87
Figure 90 : Corrélation entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h	p 88

Figure 91 : Corrélation, surface par surface, entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique à motifs roulant à la vitesse de 90 km/h	p 89
Figure 92 : Classification acoustique des différentes surfaces à la vitesse de référence de 90 km/h à partir des mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse	p 91
Figure 93 : Représentation par ordre croissant de la pente de régression des différentes surfaces obtenue pour les mesures de bruit en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse	p 92
Figure 94 : Corrélation entre niveaux de bruit mesurés au passage et en continu (à gauche) et entre les pentes mesurées au passage et en continu (à droite). Statistique incluant les 17 revêtements testés avec le pneumatique lisse	p 92
Figure 95 : Représentation qualitative des niveaux de bruit en tiers d'octave mesurés au passage à 90 km/h pour l'ensemble des surfaces testées dans le cas du pneumatique lisse	p 93
Figure 96 : Comparaison des spectres de bruit mesurés en continu (en haut) et au passage (en bas) dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h	p 94
Figure 97 : Corrélation entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h	p 94
Figure 98 : Corrélation, surface par surface, entre niveaux de bruit en 1/3 d'octave mesurés en continu et au passage à partir de l'ensemble des fréquences comprises entre 400 Hz et 4000 Hz dans le cas du pneumatique lisse roulant à la vitesse de 90 km/h	p 95
Figure 99 : Différence de niveau de bruit CPX entre le pneumatique à motifs et le pneumatique lisse pour l'ensemble des surfaces testées à la vitesse de 90 km/h	p 96
Figure 100 : Spectres CPX distinguant les quatre catégories de revêtements de chaussée pour le pneumatique à motifs (colonne de gauche) et le pneumatique lisse (colonne de droite)	p 98
Figure 101 : Procédure d'enveloppement 2D – En haut : Massif élastique semi-infini écrasé sur un profil de texture – En bas : distribution de pression de contact évaluée conjointement	p 100
Figure 102 : Schéma de calcul des niveaux de bruit par le modèle HyRoNE	p 100
Figure 103 : Correspondance modèle / mesure en termes de niveaux globaux reconstruits pour le pneumatique lisse (à gauche) et le pneumatique sculpté (à droite)	p 101
Figure 104 : Relation entre niveaux de bruit au passage et niveaux de texture enveloppée dans le tiers d'octave 500 Hz	p 102
Figure 105 : Exemple d'enveloppement 3D périodique obtenu sur une surface de 25 mm x 500 mm à la résolution de 0,8 mm	p 103
Figure 106 : Différence entre les niveaux de texture enveloppée 3D pour plusieurs valeurs de E et les niveaux de texture enveloppée 2D de référence $E_0=6$ Mpa pour 4 planches différentes	p 103
Figure 107 : Donnée d'entrée de la procédure d'enveloppement 3D – Haut : bande de roulement du pneumatique – Centre : texture du revêtement – Bas : rugosité combinée pneumatique/revêtement	p 104
Figure 108 : Méthode de calcul de l'enveloppement 3D – En blanc : rugosité combinée – En noir : bloc de gomme glissant – En rouge : profil médian retenu	p 105
Figure 109 : Résultats de calcul de l'enveloppement 3D – En haut : surface enveloppée – En bas : carte de pressions de contact (échelle en Mpa)	p 105
Figure 110 : Distribution transversale de pression moyennée sur la longueur du relevé pour le pneumatique lisse (courbe noire) et le pneumatique sculpté (courbe rouge)	p 106
Figure 111 : Exemples de profils extraits	p 106
Figure 112 : Spectres de texture enveloppée en 3D en fonction de la fréquence temporelle pour une vitesse V de 90 km/h – A gauche : pneumatique sans motifs – A droite : pneumatique sculpté	p 107
Figure 113 : Cartes de corrélation texture enveloppée/bruit du pneu sculpté- A gauche : enveloppement 2D – A droite : enveloppement 3D	p 107
Figure 114 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux globaux au passage reconstruits à 90 km/h avec le pneumatique sculpté	p 108

Figure 115 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux au passage par bandes de tiers d'octave à 90 km/h avec le pneumatique sculpté pour 6 des 11 revêtements utilisés pour construire le modèle – Niveaux mesurés en rouge- Niveaux prédits par le modèle en noir	p 109
Figure 116 : Atténuation due à l'effet de propagation entre source et microphone calculée pour les BBTM 0/4 et 0/6 évalués dans le cadre de la tâche 2	p 109
Figure 117 : Correspondance modèle/mesure en termes de niveaux au passage par bandes de tiers d'octave à 90 km/h avec le pneumatique sculpté pour les BBTM 0/4 et BBTM 0/6 mesurés dans le cadre de la tâche 2 – Niveaux mesurés en rouge – Niveaux prédits par le modèle sans correction d'absorption en trait continu noir – Niveaux prédits avec correction d'absorption en trait tireté noir	p 110
Figure 218 : Rolling noise is generated by complex physical mechanisms (from Dubois [32])	p 111
Figure 119 : Multi-asperity contact model: macroscale (left) and microscale (right) (from [32])	p 111
Figure 120 : Tyre/road contact modelling by means of a multi-asperity approach (adapted from [32]): the present study focuses on the partitioning of the road surface	p 112
Figure 121 : 3D measured texture (left) of a dense asphalt concrete 0/10 and associated binary image (middle) and gray level image (right)	p 113
Figure 122 : Main steps for partitioning of a road surface	p 114
Figure 123 : 3D texture image of a sample area of surface E2 (left) and initial segmentation results after watershed algorithm (right) using Matlab® code	p 114
Figure 124 : Contours of asperities appearing as empty lines after using the Matlab® watershed Algorithm	p 115
Figure 125 : Segmentation result obtained by combining watershed and Voronoï algorithms in Matlab®	p 115
Figure 126 : Segmentation result by use of watershed algorithm of the Python™ code	p 116
Figure 127 : Four possible situations occurring during the correction step: (1) well defined summit of the asperity in terms of contact calculation – $z_k = z_b$, (2) problem type 1 – z_k and z_b are different, (3) problem type 2 – $z_k = z_b$ but located on the contour of the asperity, (4) problem type 1 & 2 occurring simultaneously – z_k and z_b are different and z_k is located on the contour	p 117
Figure 128 : Solution to deal with problem type 1: (1) the problematic asperity is divided into two new asperities using local watershed segmentation, (2) the problem is not treated if z_k and z_b are too close	p 117
Figure 129 : Solution to deal with problem type 2: (1) the problematic asperity merges with some pixels of a neighbouring asperity to remove the summit from the contour, (2) if z'_k is too close to the contour, both asperities are merged, (3) merging with neighbouring pixels leads to a new summit located on the contour, the asperities must be merged, leading to problem 1	p 118
Figure 130 : Solution to deal with problem type 1 and 2 appearing simultaneously	p 118
Figure 131 : Final partitioning for a DAC 0/10 road surface: Matlab® code result (left) and Python™ code result (right)	p 118
Figure 132 : 3D texture of road surface A (BBDR 0/6)	p 120
Figure 133 : 3D texture of road surface A' (ES 8/10)	p 120
Figure 134 : 3D texture of road surface E1 (BBSG 0/10)	p 120
Figure 135 : 3D texture of road surface E2 (BBSG 0/10)	p 120
Figure 136 : 3D texture of road surface F (Colgrip 1.5/3)	p 120
Figure 137 : 3D texture of road surface G0 (BBS 0/10)	p 120
Figure 138 : 3D texture of road surface L2 (SE 0/4)	p 120
Figure 139 : 3D texture of road surface M1 (BBTM 0/10)	p 121
Figure 140 : 3D texture of road surface M2 (BBTM 0/6)	p 121
Figure 141 : New 3D texture measurement system developed at Ifsttar	p 121
Figure 142 : New 3D texture of road surface A (BBDR 0/6)	p 121
Figure 143 : New 3D texture of road surface A' (ES 8/10)	p 122
Figure 144 : New 3D texture of road surface E1 (BBSG 0/10)	p 122
Figure 145 : New 3D texture of road surface E2 (BBSG 0/10)	p 122
Figure 146 : New 3D texture of road surface G0 (BBS 0/10)	p 122
Figure 147 : New 3D texture of road surface L2 (SE 0/4)	p 122
Figure 148 : New 3D texture of road surface M1 (BBTM 0/10)	p 122
Figure 149 : New 3D texture of road surface M2 (BBTM 0/6)	p 122
Figure 150 : New 3D texture of road surface ISO (BBSG 0/8)	p 122

Figure 151 : 3D texture of a sample zone of surface A (left) and partitioning result (right)	p 123
Figure 152 : 3D texture of a sample zone of surface A' (left) and partitioning result (right)	p 123
Figure 153 : 3D texture of a sample zone of surface E1 (left) and partitioning result (right)	p 123
Figure 154 : 3D texture of a sample zone of surface E2 (left) and partitioning result (right)	p 124
Figure 155 : 3D texture of a sample zone of surface F (left) and partitioning result (right)	p 124
Figure 156 : 3D texture of a sample zone of surface G0 (left) and partitioning result (right)	p 124
Figure 157 : 3D texture of a sample zone of surface L2 (left) and partitioning result (right)	p 124
Figure 158 : 3D texture of a sample zone of surface M1 (left) and partitioning result (right)	p 125
Figure 159 : 3D texture of sample zone of surface M2 (left) and partitioning result (right)	p 125
Figure 160 : New 3D texture of a sample zone of surface A (left) and partitioning result (right)	p 125
Figure 161 : New 3D texture of a sample zone of surface A' (left) and partitioning result (right)	p 126
Figure 162 : New 3D texture of a sample zone of surface E1 (left) and partitioning result (right)	p 126
Figure 163 : New 3D texture of a sample zone of surface E2 (left) and partitioning result (right)	p 126
Figure 164 : New 3D texture of a sample zone of surface G0 (left) and partitioning result (right)	p 126
Figure 165 : 3D texture of a sample zone of surface L2 (left) and partitioning result (right)	p 127
Figure 166 : 3D texture of a sample zone of surface M1 (left) and partitioning result (right)	p 127
Figure 167 : 3D texture of a sample zone of surface M2 (left) and partitioning result (right)	p 127
Figure 168 : New 3D texture of a sample zone of surface ISO (left) and partitioning result (right)	p 127
Figure 169 : Two remaining asperities with problem type 2 in the sample zone of surface ISO	p 128
Figure 170 : Single Degree of Freedom System	p 130
Figure 171 : Circular ring model	p 131
Figure 172 : Orthotropic plate model	p 131
Figure 173 : Symmetrical periodic element of a tyre	p 132
Figure 174 : Full 3D model	p 132
Figure 175 : Schematic of the experiment setup	p 133
Figure 176 : A model of a tyre subjected to a punctual excitation force	p 133
Figure 177 : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the rotating ring, circular beam of Timoshenko, orthotropic plate, and periodic 3D models of a tyre inflated at 2 bars	p 134
Figure 178 : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the full (x) and periodic 3D (-) models of tyre, the inflation pressure is ignored	p 135
Figure 179 : Effect of the inflation pressure on the radial driving point mobility obtained by a periodic 3D model of tyre	p 135
Figure 180 : Comparison of the radial driving point mobility obtained by the rotating ring, Timoshenko circular beam, orthotropic plate, periodic 3D, and experimental results of tyre inflated at 2 bars	p 136
Figure 181: Cross section of a non-homogeneous grooved tyre	p 136
Figure 182: The radial point mobility of a non-homogeneous grooved tyre modeled by a periodic 3D approach	p 137
Figure 183 : Représentation graphique de la zone de contact à un instant donné pour les chaussées F (gauche) et C (droite) – zone en contact avec la gomme (jaune), cavités fermées (rouge), volume d'air ouvert (dégradé de bleu représentant la profondeur relative du volume)	p 139
Figure 184 : Répartition du volume d'air dans la zone de contact en fonction de la profondeur pour plusieurs forces de contact (niveaux de gris) calculé pour un contact statique dans le cas des chaussées F (gauche) et C (droite)	p 139
Figure 185 : Distribution des sources de bruit calculée à un instant donné – limites des zones en contact (-) – zones de source considérées (-)	p 140
Figure 186 : Spectres de bruit par bande de tiers d'octave calculés et mesuré pour la chaussée A à 90 km/h	p 140
Figure 187 : Domaine fluide 3D (à gauche) et représentation 2D (à droite) de la configuration géométrique étudiée. Les flèches vertes représentent les déplacements des surfaces	p 142
Figure 188 : Détails du maillage de la cavité cylindrique (à gauche) et du dièdre pneumatique/chaussée (à droite)	p 142
Figure 189 : Pression en fond de cavité en fonction du temps au cours du passage du pneumatique sur la cavité cylindrique – A gauche : mesure (Hamet et al., [66]) – A droite : Simulation CFD	p 143
Figure 190 : Champ de pression à l'arrière du pneumatique à un instant donné	p 143

Figure 191 : Comparaison des signaux calculé et mesuré par Hamet et al. [67] à 32,5 cm à l'arrière du pneumatique pour une vitesse de 60 km/h	p 143
Figure 192 : Evolution au cours du temps de la hauteur du fond de la cavité contrôlant la variation de volume	p 144
Figure 193 : Comparaison des pressions obtenues par un calcul 2D sans (courbes noires) et avec (courbes rouges) variation de volume- A gauche : pression en fond de cavité – Au centre : onde générée à l'avant – A droite : onde générée à l'arrière	p 144
Figure 194 : Configuration géométrique du cas de la rainure transversale ouverte	p 145
Figure 195 : Signaux de pression calculés à 20 cm à l'avant et à l'arrière de la zone de contact	p 145
Figure 196 : Configuration géométrique du cas de la rainure transversale ouverte ventilée	p 145
Figure 197 : Evolution de la pression calculée au fond de la rainure à 2,5 cm du centre du contact pour les cas de la rainure ventilée et non ventilée	p 145
Figure 198 : Configuration 2D adoptée pour la caractérisation de l'effet de porosité latérale	p 146
Figure 199 : Pressions calculées en fonction de l'épaisseur h des canaux –A gauche(a) : pression calculée dans une cavité au cours du passage du pneumatique – Au centre(b) : spectre de pression calculé devant le pneumatique – A droite © : spectre de pression calculé à l'arrière du pneumatique	p 146
Figure 200 : Gauche (a) : résistivité à l'écoulement de l'air pour $U=0,01$ m/s en fonction de l'épaisseur h des canaux – Droite (b) : résistivité à l'écoulement en fonction de la vitesse U rapportée à la valeur pour $U=0,01$ m/s, pour les différentes épaisseurs de canaux	p 147
Figure 201 : Evolution des niveaux de bruit calculés à l'avant et à l'arrière du pneumatique en fonction de la résistivité à l'écoulement de l'air	p 148
Figure 201 : Configuration de calcul adoptée – A gauche : réseau de rainures – A droite : géométrie du pneumatique et de la zone de contact	p 148
Figure 202 : A gauche(a) : pressions au passage du pneumatique pour différentes positions latérales par rapport au centre de la zone de contact – A droite (b) : Carte de pression vue de dessus	p 149
Figure 203 : Spectres des pressions acoustiques évalués en plusieurs points situés à 20 cm du centre de la zone de contact	p 149
Figure 204 : Evaluations de la résistivité à l'écoulement de l'air pour les réseaux de rainures – A gauche : visualisation d'un écoulement au travers d'un échantillon de 10 cm x 10 cm – A droite : évolution de la résistivité à l'écoulement en fonction de la vitesse moyenne	p 150
Figure 205 : (a) Tyre on the road; (b) Tyre without the road	p 151
Figure 206 : Pipe resonators in the contact zone between a tyre and a road	p 151
Figure 207 : An arbitrary flange with a network inside: (a) Total pressure; (b) Pressure directly from the source and reflected by the flange; € Pressure radiating from the network	p 152
Figure 208 : Two dimensional junctions	p 156
Figure 209 : (a) T junction with left branch; (b) T junction with right branch; (c) Cross junction	p 157
Figure 210 : An example of network for the chromosome representation	p 157
Figure 211 : Network between a round surface and a rigid plane surface	p 160
Figure 212 : (a) Half of meshes of the boundary element model of a rectangular tube with a cylindrical flange; (b) Details of the mesh of the tube	p 160
Figure 213 : (a) End corrections of longitudinal pipes with cylindrical flanges of different widths within 2000Hz ($ka < 0.23$); (b) Standard deviations and mean values of end corrections of longitudinal pipes with cylindrical flanges of different widths	p 161
Figure 214: (a) Half of meshes of the boundary element model of a rectangular tube with a part of tyre flange; (b) Details of the mesh of the tube	p 162
Figure 215 : Sketch of experimental setup	p 162
Figure 216 : (a) The experimental set-up; (b) flange used in calculations and experiments	p 163
Figure 217 : (a) Network; (b) Wooden network between a cylinder and a plane surface	p 163
Figure 218 : SPL of the network between a cylinder and a plane surface: (a) Predicted results; (b) Measured results	p 164
Figure 219 : (a) Optimized network; (b) Wooden optimized network between a cylinder and a plane surface	p 165
Figure 220 : SPL of the optimized network between a cylinder and a plane surface: (a) Predicted results; (b) Measured results	p 165
Figure 221 : (a) Optimized network without flange; (b) Wooden network for the measurements	p 166

Figure 222 : Measured SPL for the optimized wooden network with the resonant frequency 1400Hz	p 166
Figure 223 : (a) Tyre with an open network; (b) Tyre with a closed network	p 166
Figure 224 : (a) The load of five concrete cylinders; (b) The contact zone between the tyre and the road	p 167
Figure 225 : (a) The tyre on the floor; (b) The contact area given by the floor	p 167
Figure 226 : (a) The simplified network; (b) The meshes of the BEM model of the tyre used in the multi-domain coupling methods	p 168
Figure 227 : (a) Measured results of the network between a tyre and a plane surface; (b) Predicted results of the network between a tyre and a plane surface	p 169
Figure 228 : (a) An example of the tyre with treads; (b) Road textures	p 169
Figure 229 : Networks (including end corrections) in the contact zone with targeted resonant frequencies (The vertical direction is the rolling direction): (a) 1400Hz; (b) 1400Hz and 1250Hz; € 1400Hz, 1250Hz and 1050Hz (There are five closed ends in the middle of the contact zone). SPL at R for a tyre with networks in the contact zone: (d) One network targeting 1400Hz; € Two networks targeting 1400Hz and 1250Hz; (f) Three networks targeting 1400Hz, 1250Hz and 1050Hz	p 171
Figure 230 : Periodic networks (including end corrections) with 4 resonant frequencies (The vertical direction is the rolling direction): (a) Network 1; (b) Network 2; € Network 3. SPL at R for periodic networks with 4 resonant frequencies: (d) Network 1; € Network 2; (f) Network 3	p 173
Figure 231 : Road texture in the contact zone	p 175
Figure 232 : (a) Meshes of half the boundary element model of the texture with 2 columns and 3 rows under the smooth tyre; (b) SPL at R (1,0,0.265)m for the network with 2 columns and 3 rows	p 176
Figure 233 : Choix des géométries	p 181
Figure 234 : Choix des revêtements	p 182
Figure 235 : Choix des conditions de trafic	p 183
Figure 236 : Tracé de la répartition horaire de l'indicateur acoustique L_{Aeq} et de l'indicateur L_{den}	p 184
Figure 237 : Tracé de l'indicateur L_{den} pour divers revêtements	p 185
Figure 238 : Tracé du spectre horaire du L_{Aeq} pour divers revêtements	p 186
Figure 239 : Administration Django	p 187
Figure 240 : Modèle MVC appliqué à la DEUFRABASE	p 190

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal Highway Institute)
BBDr	Béton Bitumineux Drainant
BBSG	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
CB	Coast-By method
CPB	Coast Pass-By method
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
CPX	Close ProXimity method
DAC	Dense Asphalt Concrete
DEUFRAKO	Deutsch-Französische Kooperation
ENPC	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
EPDM	Ethylène – Propylène – Diène - Monomère
ES	Enduit Superficiel
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Techniques des Transports de l'Aménagement et des Réseaux
INRETS	Institut de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
LA_{eq}(Δx)	Niveau sonore équivalent sur une distance Δx
LA_{max}	Niveau sonore maximum au passage d'un véhicule
LAE	Laboratoire d'Acoustique Environnementale
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
L_{den}	Niveau sonore moyen jour – soirée – nuit
LIDAK	Leise Innovative Deckschicht auf Kunststoffbasis
MVC	Architecture logiciel Modèle – Vue - Contrôleur
NMPB 08	Nouvelle Méthode de Préviation du Bruit 2008
ODSurf	modelling and realization of a low-noise Optimal Dense Surface
PMP	Profondeur Moyenne de Profil
PMT	Profondeur Moyenne de Texture
PTE	Profondeur de Texture Equivalente
P2RN	Prediction and Propagation of Rolling Noise
RWTH	Université Technique de Rhénanie-Westphalie
SPERoN	Statistical Physical Explanation of Rolling Noise
UHPC	Ultra High Performance Concrete

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr